

TUGAS AKHIR - TM 141585

PENGARUH VARIASI KETEBALAN BATANG MAGNET DAN *AIR GAP* TERHADAP TORSI PADA *RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR* TIPE EKSTERNAL

RAHMAT IKHRAMADHANI
NRP. 021116 45 000063

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGARUH VARIASI KETEBALAN BATANG MAGNET
DAN *AIR GAP* TERHADAP TORSI PADA *RADIAL
MAGNETIC SPUR GEAR* TIPE EKSTERNAL**

RAHMAT IKHRAMADHANI
NRP 021116 45 000063

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TM 141585

THE EFFECT OF MAGNETIC THICKNESS AND AIR GAP VARIATION TOWARDS TORQUE ON EXTERNAL TYPE OF RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR

RAHMAT IKHRAMADHANI
NRP 021116 45 000063

Advisor Lecturer
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Department Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**PENGARUH VARIASI KETEBALAN BATANG
MAGNET DAN AIR GAP TERHADAP TORSI PADA
RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR TIPE EKSTERNAL**

TUGAS AKHIR

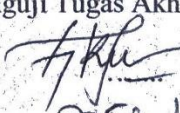
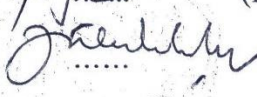


Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMAT IKHRAMADHANI

NRP. 021116 45 000063

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA
NIP. 196508101991021001  (Pembimbing)
2. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT
NIP. 196807061999031004  (Penguji I)
3. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD.
NIP. 197909262005011001  (Penguji II)
4. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E
NIP. 196511031990021001  (Penguji III)

SURABAYA

JULI, 2018

PENGARUH VARIASI KETEBALAN BATANG MAGNET DAN AIR GAP TERHADAP TORSI PADA RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR TIPE EKSTERNAL

Nama : Rahmat Ikhramadhani
NRP : 02111645000063
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Abstrak

Magnetic gear memanfaatkan gaya magnet pada bahan magnet untuk menggerakkan rotor, dimana mekanisme *frictionless* ini dikarenakan adanya celah diantara rotor yang disebut *air gap*. Dengan mekanisme tanpa kontak, maka *magnetic gear* tidak akan mengalami kerugian seperti munculnya panas, getaran, suara bising dan kerusakan akibat gaya gesek. Selain itu perawatan akan lebih sederhana tanpa sistem pelumasan. Akan tetapi, *magnetic gear* masih memiliki kelemahan yaitu torsi densitas yang dihasilkan lebih rendah daripada *mechanical gear*. Oleh karena kelemahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mencari cara meningkatkan torsi densitas pada *magnetic gear*. Kemampuan kerja *magnetic gear* dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu bahan magnet, geometri (tebal) batang magnet, dan besar jarak *air gap*. Untuk mengetahui pengaruh hal tersebut terhadap *reability magnetic gear* maka dilakukan simulasi dengan metode *finite element* dengan menggunakan *software Ansys* dan *FEMM*.

Simulasi dilakukan dengan menetapkan bahan magnet yaitu *Neodymium Iron Boron Magnets (NdFeB)*, rasio *gear* 1:2, dan jenis topologi radial spur *magnetic gear* tipe eksternal. Lalu variabel yang divariasikan yaitu besar *air gap* (1 mm, 2 mm, dan 3 mm) dan ketebalan batang magnet penyusun rotor. Terdapat tiga macam HS rotor dan LS rotor yang dipasangkan sehingga menjadi sembilan pasang *magnetic gear* (MG). Simulasi ini menghasilkan

besaran nilai torsi maksimum (T) yang mampu diterima *magnetic gear* dan plot *flux density* (B).

Studi ini menunjukkan bahwa besar jarak *air gap* berbanding terbalik dengan besar torsi maksimum pada *magnetic gear* dimana torsi terbesar terdapat pada *air gap* 1 mm. Sedangkan ketebalan batang rotor berbanding lurus dengan besar torsi *magnetic gear* dimana pasangan *magnetic gear* yang memiliki torsi maksimum tertinggi yaitu *magnetic gear* ke-sembilan (MG 9) dengan ketebalan rotor paling besar, baik pada HS rotor maupun LS rotor. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi informasi berupa spesifikasi dari geometri *magnetic gear* tertentu dan menjadi masukan dalam perkembangan *magnetic gear*.

Kata kunci : *Magnetic gear, torsi, air gap, ketebalan batang magnet, magnetic spur gear.*

**THE EFFECT OF MAGNETIC THICKNESS AND AIR GAP
VARIATION TOWARDS TORQUE ON EXTERNAL TYPE
OF RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR**

Name : Rahmat Ikhramadhani
NRP : 02111645000063
Departement : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisor Lecturer : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Abstract

Magnetic gear use magnetic force from magnetic material to drive rotor, where the frictionless mechanism is due to a gap between rotor called air gap. With frictionless mechanism, magnetic gear will not experience losses such as emergence of heat, vibration, noise, and damage due to friction. In addition, maintenance will be simpler without lubrication system. However, magnetic gear still has a weakness that is a lower torque. Maximum torque of magnetic gear is lower than mechanical gear. Therefore, this research was conducted to find out how to increase the torque on magnetic gear. The reability of magnetic gear is influenced by several things such as magnetic material, geometry or thickness of magnetic rod, and distance of air gap. To know the effect of it, then we do simulation with finite element method using FEMM and Ansys software.

The simulation is done by determining magnetic material ie Neodymium Iron Boron Magnets (NdFeB), 1:2 gear ratio, and type of topology is external radial magnetic spur gear. Then variable are the distance of air gap (1 mm, 2 mm, and 3 mm) and the thickness of magnetic rod. There are three kinds of high speed rotor and low speed rotor. They are paired each other, so it becomes nine pairs of magnetic gear. This simulation generates the maximum value of torque (T) and flux density plot (B).

This study shows that the distance of air gap was inversely proportional with maximum torque, where the highest torque was found in 1 mm air gap. While the tickness of magnetic rod was directly proportional with maximum torque, where the highest torque was found on the 9th magnetic gear. This 9th magnetic gear has largest magnetic rod thickness, either on high speed rotor and low speed rotor. The result of this study can be information in the form of specifications of spesific geometry of magnetic gear. It can also be a reference to further research on the effect of air gap and magnetic rod thickness to magnetic gear torque.

Key word : *Magnetic gear, torque, air gap, magnetic rod thickness, magnetic spur gear*

KATA PENGANTAR

Dengan mengucap segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, rahmat dan hidayah- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul : **PENGARUH VARIASI KETEBALAN BATANG MAGNET DAN AIR GAP TERHADAP TORSI PADA RADIAL MAGNETIC SPUR GEAR TIPE EKSTERNAL.**

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan syarat kelulusan akademis dan memperoleh gelar Sarjana dalam menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Terlaksananya dan tersusunnya tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan dan kerjasama yang baik dari semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat di dalam Tugas Akhir ini. Oleh Karena itu pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan bantuan sehingga penulis mampu mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Bambang Pramujati, S.T. M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Bapak Suwarno, S.T. M.Sc., Ph.D. selaku koordinator tugas akhir Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Ibu Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Wali yang telah memberikan gambaran, motivasi dan bantuan dalam menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
5. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT; Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD; dan Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam rangka perbaikan tugas akhir ini.

6. Semua dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
7. Kedua orang tua yang telah memberikan dorongan moril, materil, serta spiritual kepada penulis.
8. Seluruh teman-teman mahasiswa di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS dan semua pihak yang telah membantu terselesaikannya laporan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih.
9. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Akhirnya semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk sekarang dan masa depan yang akan datang. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kekurangan, sehingga saran dan kritik yang membangun mampu menyempurnakan penulisan laporan dimasa yang datang.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN VARIABEL.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Kemagnetan (Magnetostatika)	5
2.1.1 Medan Magnet.	6
2.1.2 Permeabilitas Magnet.....	8
2.1.3 Histerisis Magnet	10
2.2 <i>Magnetic gear</i>	13
2.3 <i>Magnetic Spur Gear</i>	15
2.3.1 <i>Magnetic Spur Gear</i> berdasarkan Arah Gaya Magnet.....	16
2.3.2 <i>Magnetic Spur Gear</i> berdasarkan Konfigurasi.....	17
2.3.3 Kelebihan dan Kekurangan <i>Magnetic gear</i> dan <i>Mechanical gear</i>	18
2.4 Bahan Magnetic	19
2.4.1 Jenis-Jenis Material Magnet Permanen.....	19

2.4.2 Kelebihan dan Kekurangan Jenis-Jenis Magnet.....	22
2.4.3 Jenis Magnet yang digunakan (NdFeB)	25
2.5 Rasio <i>Gear</i> dan Jumlah Gigi Magnet	28
2.6 Torsi <i>Magnetic gear</i>	29
2.6.1 Perhitungan Drive Magnet Surface Current Density.....	34
2.6.2 Perhitungan External <i>Flux density</i> Field	35
2.6.3 Perhitungan Magnetisasi Paralel	35
2.7 <i>Software</i> Analisis.....	35
2.8 Penelitian Terdahulu.....	36

BAB III METODOLOGI

3.1 Variabel Penelitian	41
3.1.1 Variable Bebas	41
3.1.2 Variable Terkontrol	42
3.2 Peralatan Penelitian	42
3.2.1 Spesifikasi <i>Magnetic gear</i>	42
3.2.2 Perangkat Lunak.....	43
3.3 Langkah-langkah Penelitian	44
3.3.1 Studi Literatur	44
3.3.2 Tahap <i>Pre-Processing</i> dengan Menggunakan SolidWork	44
3.3.4 Tahap <i>Processing</i> dengan Menggunakan Ansys.....	45
3.3.3 Tahap <i>Processing</i> dengan Menggunakan FEMM.....	53
3.3.5 Tahap <i>Post-Processing</i>	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Vektor Gaya Magnet	8
Gambar 2.2 Kurva B-H Beberapa Bahan.....	9
Gambar 2.3 Kurva Histerisis.....	10
Gambar 2.4 Kurva Histerisis untuk Material <i>Hard</i> dan <i>Soft</i>	12
Gambar 2.5 Magnet <i>Gear</i> Dan Mekanik <i>Gear</i>	13
Gambar 2.6 <i>Magnetic gear</i> dan Diagram Torsi	14
Gambar 2.7 Desain <i>Magnetic gear</i> Mengikuti Desain <i>Mechanical gear</i>	15
Gambar 2.8 <i>Magnetic gear</i> Spur Tipe Radial Dan Tipe Paralel	16
Gambar 2.9 Beberapa Tipe Konfigurasi <i>Magnetic gear</i> Spur (A) Permanent Magnetic Spur <i>Gear</i> , (B) Inner Type Spur <i>Gear</i> , (C) Salient Pole Type Spur <i>Gear</i>	17
Gambar 2.10 Magnet Keramik.....	19
Gambar 2.11 Magnet Alnico.....	20
Gambar 2.12 Samarium-Cobalt magnet.....	21
Gambar 2.13 Neodymium Magnet.....	21
Gambar 2.14 Sifat Kemagnetan Magnet Permanen.....	24
Gambar 2.15 Perbandingan Kekuatan Magnet Permanen	26
Gambar 2.16 Desain <i>Magnetic gear</i>	28
Gambar 2.17 Sketsa <i>Source</i> Dan <i>Drive</i> Magnet untuk Radial <i>Magnetic gear</i>	29
Gambar 2.18 Ilustrasi Arah Current, Bext, dan Gaya.....	31
Gambar 2.19 Ilustrasi (a) Sisi Integrasi Tangensial dan (b) Sisi Integrasi Radial.....	32

Gambar 2.20 (a) Bentuk Material <i>Gear</i> , (b) Prototype Sistem <i>Magnetic gear</i>	36
Gambar 2.21 (a) Permanent Magnetic Spur <i>Gear</i> , (b) Inner Type Spur <i>Gear</i> , (c) Salient Pole Type Spur <i>Gear</i>	38
Gambar 3.1 Karakteristik Bahan Magnet yang digunakan	47
Gambar 3.2 Pembuatan <i>Region Magnetic gear</i>	48
Gambar 3.3 Bentuk <i>Meshing</i>	48
Gambar 3.4 <i>Setup</i> Analisis Mesh.....	49
Gambar 3.5 Hasil Analisis <i>Mesh</i>	50
Gambar 3.6 Pembuatan <i>Part Motion</i> pada <i>Magnetic gear</i>	51
Gambar 3.7 <i>Setup</i> Analisis.....	52
Gambar 3.8 <i>Validation Check</i>	53
Gambar 3.9 <i>Assign Material</i> pada FEMM.....	54
Gambar 3.10 <i>Assign Mesh</i> pada FEMM.....	55
Gambar 3.11 Nilai dan Arah Vektor <i>Flux density</i>	56
Gambar 3.12 Besaran Nilai <i>Flux density</i> (B).....	56
Gambar 3.13 Grafik Torsi terhadap Waktu Putaran <i>Magnetic gear</i>	57
Gambar 3.14 Desain Obyek Simulasi.....	59
Gambar 3.15 Grafik Torsi terhadap Waktu Menggunakan <i>Ansys Maxwell Electromagnetic</i>	59
Gambar 4.1 Grafik Torsi vs <i>Air Gap</i> pada MG 1, MG 2, dan MG 3	66
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Torsi vs <i>Air Gap</i> pada MG 4, MG 5, dan MG 6	67
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Torsi vs <i>Air Gap</i> pada MG 7, MG 8, dan MG 9	69

Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Torsi pada MG 3, MG 6, dan MG 9.....	70
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan <i>Flux Density</i> pada MG 3, MG 6, dan MG 9 melalui Simulai 3 Dimensi	72
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan <i>Flux Density</i> pada MG 3, MG 6, dan MG 9 melalui Simulasi 2 Dimensi	74
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Torsi Maksimum <i>Magnetic Gear</i> pada <i>Air Gap</i> 1 mm	75
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan <i>Torque Density</i> pada <i>Magnetic Gear</i> dan <i>Mechanical Gear</i>	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2 Perbandingan <i>Magnetic gear</i> Dan <i>Mechanical gear</i> (Wang, 2015).....	18
Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan Jenis-Jenis Magnet	22
Tabel 2.4 Sifat Kemagnetan Intrinsik Masing-Masing Jenis Magnet Permanen.....	24
Tabel 2.5 Perbandingan Roda Gigi Magnet Dengan Tipe Magnet Berbeda.....	25
Tabel 2.6 Perbandingan Biaya Relatif Magnet.....	25
Tabel 2.7 Sifat Magnet NdFeB (NdFeB <i>Datasheet, Eclipse Magnetics</i>).....	26
Tabel 2.8 Geometri <i>Magnetic gear</i>	38
Tabel 2.9 Hasil Penelitian G Muruganandam.....	38
Tabel 3.1 Dimensi dan Karakteristik <i>Magnetic gear</i>	43
Tabel 3.2 Variasi Diameter Dalam Rotor	45
Tabel 3.3 Variasi Pasangan Rotor HS dan Rotor LS	46
Tabel 3.4 Parameter Input dan Output Penelitian.....	58
Tabel 3.5 Proses Verifikasi.....	59
Tabel 4.1 Data Torsi Maksimum pada <i>Air Gap</i> 1 mm	75
Tabel 4.2 Data Properti <i>Magnetic Gear</i> dan <i>Mechanical Gear</i> ..	77

DAFTAR SINGKATAN DAN VARIABEL

B	: Rapat medan magnet	[Tesla]
Φ	: Fluks medan magnet	[Webers]
H	: Kuat medan magnet	[A/m]
μ	: Permeabilitas magnet	[N/A ²]
T	: Torsi	[Nm]
B_r	: <i>Ramenan Induction</i>	
H_c	: <i>Coersive force</i>	
BH_{\max}	: <i>Energy product</i>	
FEA	: <i>Finite element analysis</i>	
FEMM	: <i>finite elemen method magnetic</i>	
HS	: <i>High speed</i>	
LS	: <i>Low speed</i>	
MG	: <i>Magnetic gear</i>	
3D	: Tiga dimensi	
2D	: Dua dimensi	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada masa modern seperti sekarang, dunia industri semakin maju dengan hadirnya teknologi-teknologi terbaru. Industri dipenuhi oleh mesin-mesin canggih, baik sebagai mesin produksi utama, maupun sebagai mesin penunjang. Hal ini dimaksudkan untuk melakukan proses produksi dengan kapasitas yang lebih besar dan lebih efektif sehingga menghasilkan keuntungan yang lebih besar pula bagi industri.

Mesin-mesin maupun alat penunjang lain pada dunia industri tersusun dari banyak komponen seperti komponen listrik maupun komponen mekanik yaitu *chasing*, *shaft*, *gear*, dan lain-lain. Dari sekian banyak komponen yang terdapat di dalam mesin-mesin, *gear* (roda gigi) merupakan salah satu komponen yang penting. *Gear* berfungsi untuk mentransmisikan daya dari satu poros ke poros yang lain. Selain itu *gear* juga berfungsi untuk menyesuaikan antara besar daya yang berasal dari sumber terhadap beban yang dikerjakan oleh mesin tersebut.

Keamanan dan kelangsungan operasional pada suatu mesin perlu mendapat perhatian serius, terutama komponen yang berputar seperti *gear* yang selalu menerima beban dinamis. Sehingga, komponen vital seperti roda gigi merupakan komponen yang rawan mengalami kerusakan atau kegagalan baik itu akibat dari operasional maupun akibat umur mesin dan komponen. Telah diketahui dengan baik bahwa gear mekanis memiliki kerapatan torsi yang tinggi, namun terdapat beberapa masalah akibat gesekan kontak seperti kebisingan, panas, getaran dan bahkan terjadinya kegagalan. Kegagalan yang sering muncul adalah keausan, retak, perpatahan, dan kerusakan mekanis lain yang bisa mengakibatkan kerusakan fatal pada mesin dan berpengaruh pada komponen lain.

Banyak penelitian yang dilakukan untuk mencari solusi untuk mengatasi permasalahan pada *gear*, termasuk penelitian untuk mencari teknologi transmisi terbaru yang lebih aman dan

efektif dari *gear*. Salah satunya adalah *gear* dengan berbahan magnet (*magnetic gear*). *Magnetic gear* (MG) menawarkan keuntungan yang signifikan dengan kebisingan yang berkurang, getaran minimum, tidak diperlukan perawatan, keandalan yang meningkat, memiliki kemampuan proteksi *overload*, dan isolasi fisik antara poros input dan output. Untuk waktu yang lama, MG mendapat sedikit perhatian, hal tersebut dikarenakan kerapatan torsi yang buruk dan dari sirkuit magnetiknya yang relatif kompleks. Namun seiring perkembangan zaman *magnetic gear* menjadi perhatian besar setelah ditemukannya magnet permanen.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menemukan topologi dan posisi pemasangan batang magnet yang dapat meningkatkan keandalan *magnetic gear*. Dari penelitian-penelitian tersebut diketahui bahwa terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi keandalan (*reability*) dari *magnetic gear*, diantaranya yaitu bahan magnet yang digunakan, jarak *air gap*, dan geometri batang magnet. Untuk mengetahui pengaruh hal-hal tersebut terhadap keandalan *magnetic gear*, maka dilakukan penelitian ini terhadap *magnetic gear*. Penelitian ini berbentuk simulasi desain dengan bantuan *software* dengan memvariasikan beberapa properti di dalam *magnetic gear*. Sehingga diharapkan akan menjadi sebuah rekomendasi bagi dunia industri untuk mengatasi masalah-masalah pada sistem transmisi mekanik.

1.2 Rumusan Masalah

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kemampuan kerja (*reability*) *magnetic gear* yang diukur melalui torsi dan kuat medan magnet yang dihasilkan *magnetic gear*. Sebagian dari faktor tersebut akan diatur didalam variable dan sebagian lagi akan divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *magnetic gear*. Dari variable tersebut maka ditentukanlah rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *air gap* terhadap torsi maksimum pada *magnetic gear*.

2. Bagaimana pengaruh ketebalan batang magnet penyusun *magnetic gear* terhadap torsi maksimum pada *magnetic gear*.
3. Bagaimana perbandingan *magnetic gear* dan *mechanical gear* pada volume *gear* yang sama.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini yaitu untuk mengetahui pengaruh dari beberapa properti yang divariasikan terhadap performa *magnetic gear*. Sehingga dapat digunakan sebagai rekomendasi dalam melakukan proses desain dan produksi *magnetic gear*.

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini ditinjau dari latar belakang dan rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh *air gap* terhadap torsi maksimum pada *magnetic gear*.
2. Mengetahui pengaruh ketebalan batang magnet penyusun *magnetic gear* terhadap torsi pada *magnetic gear*.
3. Mengetahui perbandingan *magnetic gear* dan *mechanical gear* pada volume luar *gear* yang sama, melalui analisis torsi density.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini antara lain sebagai berikut :

1. Topologi *mechanical gear* yang ditiru adalah roda gigi jenis *radial external spur gear*
2. Bahan yang digunakan untuk *magnetic gear* adalah magnet permanen NdFeB
3. Perhitungan pada *magnetic gear* dilakukan dengan metode analisis 3D *finite element* menggunakan *software* ANSYS dan analisis 2D *finite element* menggunakan *software* FEMM
4. Perbandingan *gear* rasio yang digunakan adalah 1:2 dengan jumlah gigi magnet 4:8

5. Besar volume *magnetic gear* yaitu diameter luar dan panjang masing-masing rotor sesuai dengan desain yang diatur pada spesifikasi geometri *gear* yang digunakan pada bab 3.
6. Perhitungan dilakukan dengan beberapa asumsi yang diatur di dalam variable bebas dan variable kontrol.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kemagnetan (Magnetostatika)

Benda yang dapat menarik besi disebut magnet. Magnet dapat diperoleh dengan cara buatan. Jika baja di gosok dengan sebuah magnet, dan cara menggosoknya dalam arah yang tetap, maka baja itu akan menjadi magnet. Baja atau besi dapat pula dimagneti oleh arus listrik. Baja atau besi itu dimasukkan ke dalam kumparan kawat, kemudian ke dalam kumparan kawat dialiri arus listrik yang searah.

Ujung-ujung sebuah magnet disebut kutub magnet. Garis yang menghubungkan kutub-kutub magnet disebut sumbu magnet dan garis tegak lurus sumbu magnet serta membagi dua sebuah magnet disebut garis sumbu. Sebuah magnet batang digantung pada titik beratnya. Sesudah keadaan setimbang tercapai, ternyata kutub-kutub batang magnet itu menghadap ke Utara dan Selatan. Kutub magnet yang menghadap ke utara di sebut kutub Utara. Kutub magnet yang menghadap ke Selatan disebut kutub Selatan.

Hal serupa dapat kita jumpai pada magnet jarum yang dapat berputar pada sumbu tegak (jarum deklinasi). Kutub Utara jarum magnet deklinasi yang seimbang didekati kutub Utara magnet batang, ternyata kutub Utara magnet jarum bertolak. Bila yang didekatkan adalah kutub selatan magnet batang, kutub utara magnet jarum tertarik. Kutub-kutub yang sejenis tolak-menolak dan kutub-kutub yang tidak sejenis tarik-menarik

Terdapat banyak sifat-sifat magnet yang harus diketahui terlebih dahulu. Sebelum dibahas mengenai sifat-sifat tersebut, terlebih dahulu kita mengenal symbol-simbol yang digunakan dalam kemagnetan seperti pada table 2.1

Tabel 2.1. Simbol Dan Deskripsi Simbol Dalam Kemagnetan

Simbol	Deskripsi	SI	CGS
H	<i>Magnetic Field Strength</i>	A/m	Oe
B	<i>Flux density</i>	Tesla	Gauss
M	<i>Magnetization</i>	A/m	Emu/cm ³
Φ	<i>Flux</i>	Webers	Maxwell
B _r	<i>Residual induction</i>	Tesla	Gauss
H _c	<i>Coercive force</i>	A/m	Oe
H _{ci}	<i>Intrinsic coersive force</i>	A/m	Oe
(BH) _{max}	<i>Maximum energy density</i>	A/m	Oe
T _w	<i>Maximum working temperatur</i>	°C	K
T _c	<i>Curie temperature</i>	°C	K

$$1 \text{ Oe} = 1000/4\pi \text{ A/m}$$

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$1 \text{ emu/cm}^3 = 1000 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ Maxwell} = 10^{-8} \text{ Webers}$$

2.1.1 Medan Magnet.

Jika arus dialirkan pada suatu kumparan elektromagnetik, maka akan timbul medan magnet di sekitarnya. Medan magnet (H) adalah pengaruh yang dihasilkan oleh suatu sumber medan magnet (arus listrik) di suatu ruang dimana nilai H dipengaruhi oleh arus listrik dan panjang kumparan. Sehingga jika terdapat belitan panjang l maka kekuatan magnet yang dihasilkan adalah:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (2.1)$$

Dimana:

H : Kuat medan magnet (a/m)

N : Jumlah bilitan

I : Arus (ampere)

l : panjang kumparan/lilitan (m)

Sedangkan induksi magnet adalah pengaruh dari suatu ruang yang menghasilkan suatu gaya terhadap sebuah sumber arus di ruang itu. Jadi B dihitung dengan menghitung gaya yang dialami suatu sumber arus di suatu ruang. Singkat kata

Apabila dibuat suatu bentuk arus, maka arus tersebut akan menimbulkan medan magnet dengan kekuatan tertentu (H). Apabila medan magnet tersebut berada pada suatu ruang maka akan menyebabkan induksi magnet pada benda/medium di ruang tersebut dimana induksi tersebut merupakan medan yang terdiri dari garis-garis fluks magnetik imajiner.

Fluks magnetik adalah jumlah medan magnetik (garis gaya magnet) yang dihasilkan sumber magnetik, dilambangkan dengan Φ (phi) dengan satuan weber (Wb). Kerapatan fluks magnet adalah jumlah total fluks yang menembus area yang tegak lurus dengan fluks tersebut. Hubungan antara fluks magnetik (Φ) dan kerapatan fluks magnetik ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.2)$$

Dengan:

B : Rapat fluks magnet (Tesla atau Wb/m²)

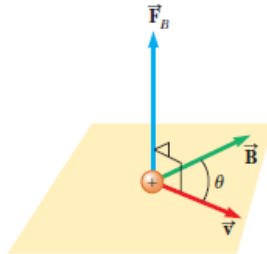
Φ : Fluks magnet (Wb)

A : Luas penampang (m²)

Ketika sebuah partikel (proton atau elektron) bermuatan listrik yang bergerak melewati sebuah medan magnet, akan timbul sebuah gaya yang dirasakan oleh muatan itu. Gaya ini biasa disebut dengan gaya magnet. Gaya magnet merupakan

besaran vektor, yaitu besaran yang memiliki nilai dan arah. Hubungan gaya magnet F (newton), medan magnet B (Tesla), dan muatan listrik q (Coulombs) dapat dilihat pada rumus dibawah ini:

$$F = qv \times B \quad (2.3)$$



Gambar 2.1 Vektor Gaya Magnet

Besarnya gaya magnet berdasarkan vektor pada gambar 2.1 adalah:

$$|F| = qvB \sin \theta \quad (2.4)$$

Salah satu hal yang paling menarik dari sifat medan magnet adalah bahwa medan magnet tidak melakukan kerja. Karena gaya akibat medan magnet akan selalu tegak lurus terhadap gerak partikel. Akibatnya gaya tersebut tidak akan melakukan kerja pada partikel tersebut. Maksudnya adalah sesuatu hal (gaya) tidak mengubah energi potensial maupun energi kinetik dari suatu partikel serta energi dalamnya (kalau partikel ini adalah sebuah sistem termodinamika).

2.1.2 Permeabilitas Magnet

Hubungan antara B dan H dijelaskan oleh permeabilitas magnet. Permeabilitas merupakan konstanta perbandingan antara rapat flux (B) dan kuat medan magnet (H) yang telah dijelaskan

di atas. Sehingga permeabilitas memiliki dimensi (volt second)/(amp meter), satuan ini dikenal juga sebagai (henry/m).

$$B = \mu H \quad (2.5)$$

Dimana:

B : Rapat garis-garis gaya.

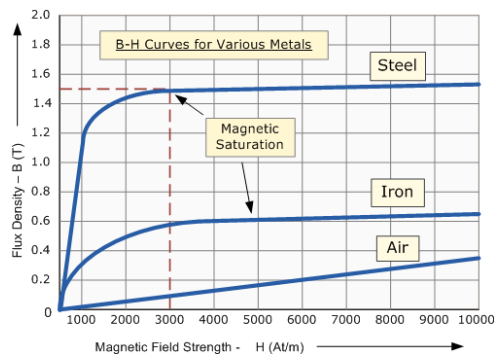
μ : Permeabilitas.

H : Kuat medan magnet.

Untuk udara dan bahan non magnetik, permeabilitas dinyatakan sebagai permeabilitas ruang kosong/ruang hampa dimana nilai permeabilitasnya adalah $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$. Untuk bahan lain maka permeabilitasnya sebanding dengan permeabilitas ruang hampa dikalikan permeabilitas relatif bahan (μ_r).

$$\frac{B}{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.6)$$

Dengan konstanta permeabilitas maka karakteristik kemagnetan suatu bahan dapat digambarkan dalam kurva perbandingan B – H pada gambar 2.2.

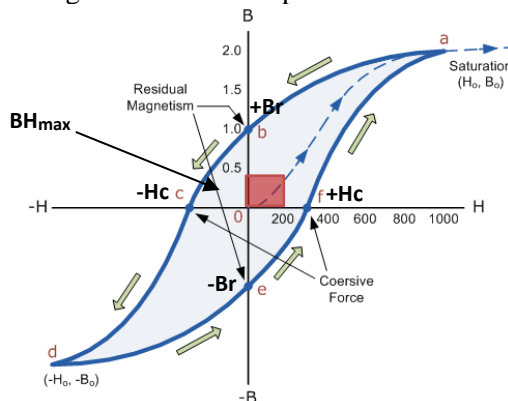


Gambar 2.2 Kurva B-H Beberapa Bahan (Taufik, 2012)

2.1.3 Histerisis Magnet

Selain medan magnet terdapat penyebab lain induksi magnet yaitu magnetisasi. Magnetisasi ini bisa dikatakan sebagai medan magnet yang sudah dimiliki oleh bahan itu, jadi magnetisasi adalah medan magnet yang berasal dari benda itu sendiri. Magnetisasi ini terjadi karena sebuah benda/medium yang memiliki kemampuan untuk menjadi magnet ditaruh di suatu medan magnet luar. Karena pengaruh luar, momen magnet benda itu (kumpulan atom-atomnya) melakukan suatu peyejajaran, akibatnya saat medan magnet dihilangkan benda itu sudah memiliki sifat kemagnetan sendiri.

Jika arus dialirkan pada suatu kumparan elektromagnetik, maka akan timbul medan magnet di sekitarnya, ketika arus dinaikkan maka medan magnet yang timbul akan meningkat sampai titik konstan, hal ini menandakan bahwa inti feromagnetik telah mencapai titik jenuhnya dan kerapatan fluks mencapai maksimum. Jika arus dihentikan fluks magnet tidak sepenuhnya hilang karena bahan inti elektromagnetik masih mempertahankan sifat kemagnetan.



Gambar 2.3 Kurva Histerisis (Taufik, 2012)

Kemampuan untuk mempertahankan sifat magnet setelah arus dihentikan disebut *retentivity*, sedangkan jumlah fluks

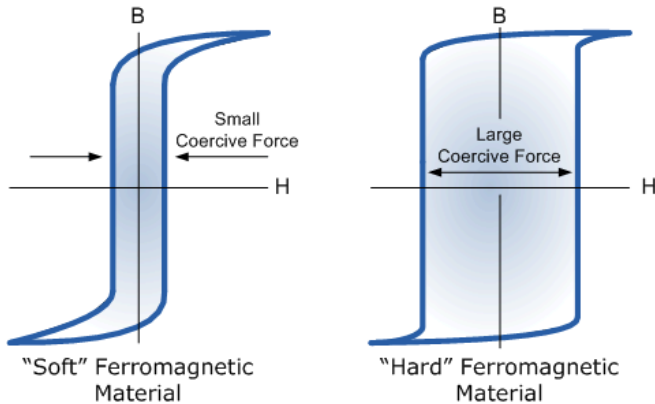
magnetik yang masih ada disebut *Magnetisme Residual*. Ketika fluks telah mencapai maksimum (jenuh) dan arus di turunkan maka akan terjadi pelebaran nilai H_c (*Coersive Force*). Sifat *retentivity*, *Magnetisme Residual* dan *Coersive Force* dijelaskan pada kurva histerisis yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. (Taufik, 2012)

Bahan ferromagnetik mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah yang bebas medan magnetik, bila bahan mendapat pengaruh medan magnetik (H) maka bahan akan memperoleh magnetisasi (B) yang besar. Jika H diperbesar maka akan makin besar pula magnetisasi B hingga sampai ke titik saturasi S . Apabila kurva magnetisasi dilanjutkan dengan mengurangi besar medan magnetik H hingga titik nol, magnetisasi B akan turun namun tidak kembali menjadi nol. Turunnya B akan membentuk kurva baru menuju titik B_r (*Ramenan Induction*) yaitu suatu kondisi dimana bahan tetap memiliki induksi magnet/magnetisasi meskipun medan magnet dari luar telah ditiadakan. Titik B_r disebut sebagai kerapatan fluks remanensi atau remanensi bahan yaitu besarnya rapat fluks magnetik B yang tertinggal pada bahan pada saat medan magnet H samadengan nol.

Untuk menghilangkan remanensi tersebut yaitu menurunkan nilai B hingga ke titik nol, maka bahan diberikan medan magnet H bernilai negatif. Lalu akan terbentuk kurva menuju titik H_c (*coersive force*) dengan nilai negatif. Titik H_c ini disebut sebagai gaya koersif atau koersivitas bahan yaitu besarnya medan magnet atau intensitas H yang diperlukan untuk mengembalikan rapat fluks magnetik menjadi nol.

Apabila siklus ini diteruskan maka akan didapat kurva dengan bentuk simetris yang dikenal dengan fenomena histeresis seperti pada gambar 2.3 di atas. Dari kurva histeresis dapat diketahui besarnya koersivitas bahan H_c , remanensi bahan B_r dan permeabilitas bahan μ yang besaran-besaran tersebut menentukan sifat dan karakteristik kemagnetan suatu bahan.

Bahan feromagnetik memiliki *retentivity* tinggi (*hard magnetic material*) sangat baik untuk memproduksi magnet permanen. Sehingga salah satu ciri bahan magnet yang kuat yaitu memiliki nilai BH_{\max} (*energy product*) yang tinggi. BH_{\max} digambarkan sebagai persegi terluas yang bisa dibuat pada kuadran II kurva histeresis dengan satuan MGOe atau KJ/m^3 . Sedangkan bahan non feromagnetik yang memiliki *retentivity* rendah (*soft magnetic material*) ideal untuk digunakan dalam elektromagnet, solenoida atau relay. Kurva histeresis yang merupakan karakterisasi *hard material magnet* dan *soft material magnet* ditunjukkan pada gambar 2.4 (Taufik, 2012)



Gambar 2.4 Kurva Histeresis untuk Material *Hard* dan *Soft* (Taufik, 2012)

Menurut Arthur F.Kip (1992), sifat dan karakteristik magnetik dari suatu bahan erat kaitannya dengan suseptibilitas magnetik (χ) dan permeabilitas magnetik (μ). Perbandingan antara magnetisasi dan medan penyebabnya yaitu medan magnet dinamakan suseptibilitas yang diberi simbol χ , sedangkan magnetisasi sering diberi simbol M . Hubungan antara χ dan M adalah sebagai berikut:

$$M = \chi H \quad (2.7)$$

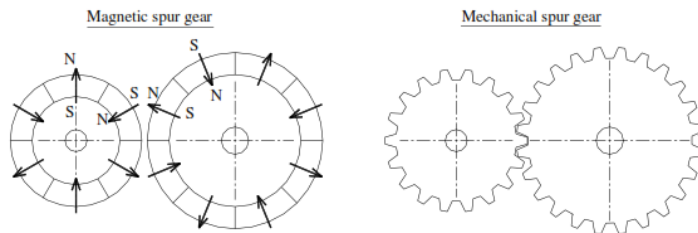
Tentu saja udara hampa tidak memiliki magnetisasi karena dia tidak bisa menyimpan sifat magnet. Perb: (2.8) nilai permeabilitas di suatu medium dengan nilainya hampa disebut permeabilitas relatif. Permeabilitas relatif diberi simbol μ_r . Permeabilitas relatif dan suseptibilitas magnet memiliki hubungan yaitu:

$$\mu = \chi + 1$$

2.2 Magnetic gear

Suatu *gear* dapat didefinisikan sebagai suatu mekanisme yang mentransfer torsi dari satu poros ke poros yang lain dengan penggunaan *magnetic gear* atau mekanik. *Mechanical gear* sudah digunakan sejak lama, dengan referensi paling awal yaitu pada 2000 tahun yang lalu. *Gear* digunakan untuk mentransmisikan daya besar dan putaran yang tepat yang dilakukan oleh gigi-gigi kedua roda yang saling berkait. *Gear* banyak digunakan karena dapat meneruskan putaran dan daya yang lebih bervariasi dan lebih kompak.

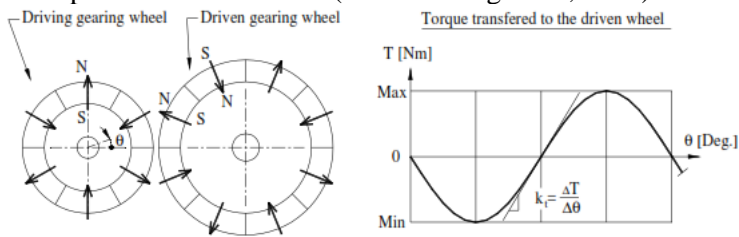
Mulai pada awal abad 19 muncul ide penggunaan *magnetic gear* dan terus bermunculan penelitian dan inovasi pada bidang teknologi *magnetic gear*. Banyaknya penelitian dibidang ini dikarenakan terdapat perbedaan mendasar pada *mechanical gear* dan *magnetic gear* yang membuat keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda.



Gambar 2.5 Magnet Gear Dan Mekanik Gear (Frank T. Jorgensen, 2010)

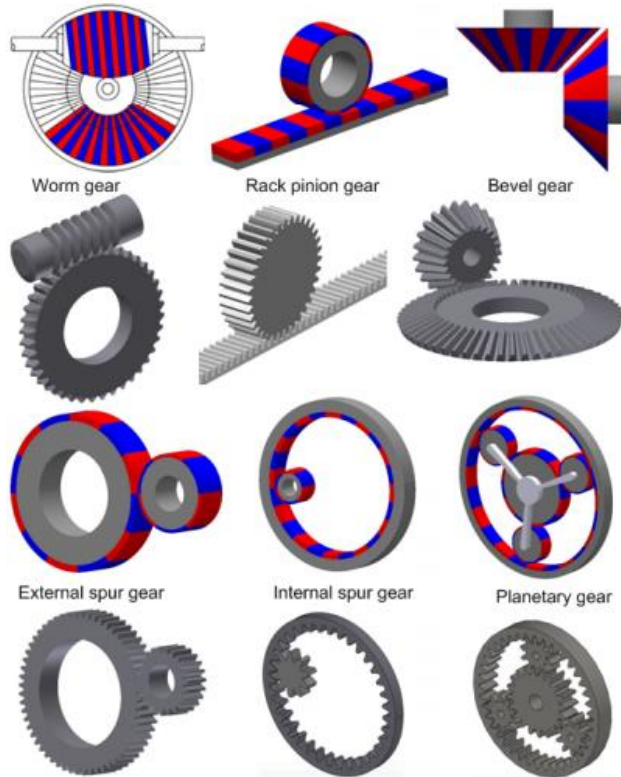
Seperti pada gambar 2.5, *mechanical gear* menggunakan gigi baja untuk mentransfer torsi. Gigi *mechanical gear* memiliki kontak fisik satu sama lain, dan akan ada pemakaian flense gigi. Sedangkan *magnetic gear* tidak memiliki kontak langsung, transfer torsi terjadi diantara dua rotor yang terdiri dari magnet permanen.

Magnetic gear tidak memiliki kontak langsung anantara rotornya, hal ini menyebabkan adanya efek torsi pegas di antara rotor. Efek torsi pegas dapat dijelaskan dengan menggambarkan satu rotor tetap (*fixed/driving wheel*) dan rotor lain berputar dengan sudut kecil (*driven wheel*). Kemudian akan ada interaksi torsi di antara rotor *gear* tergantung dari perpindahan sudut pada rotor kedua. Kejadian ini diilustrasikan pada gambar 2.6 dimana suatu *magnetic gear* terdiri dari *gear* penggerak dan roda *gear* yang digerakkan. Fenomena torsi pegas mirip dengan efek sudut torsi khusus pada mesin sinkronis. (Frank T. Jorgensen, 2010)



Gambar 2.6 *Magnetic gear* dan Diagram Torsi (Frank T. Jorgensen, 2010)

Pada awalnya *magnetic gear* dirancang sesuai dengan persamaan *gear* mekanis, dengan melihat hubungan antar gigi yang berperan untuk mendorong dan menarik gigi lainnya maka digunakanlah *gear* rasio dalam merancang. *Magnetic gear* bisa dirancang untuk mengikuti hampir semua bentuk jenis *mechanical gear* seperti pada gambar 2.7



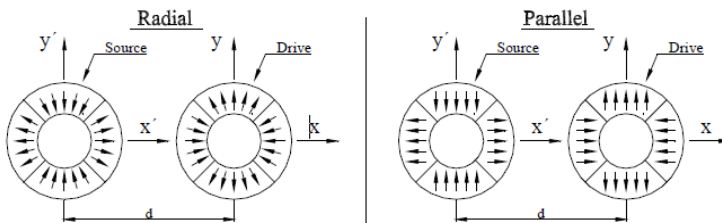
Gambar 2.7 Desain *Magnetic gear* Mengikuti Desain *Mechanical gear* (A.Matthe, 2016)

2.3 *Magnetic Spur Gear*

Magnetic gear spur pada dasarnya memiliki desain topologi yang sama dengan mekanik *gear*, dimana terdapat dua rotor atau lebih berbentuk lingkaran *gear* yang saling berinteraksi untuk melakukan transmisi torsi. Terdapat beberapa jenis *magnetic gear* spur yang dibedakan berdasarkan arah gaya magnet dan konfigurasi spur *gear*.

2.3.1 *Magnetic Spur Gear* berdasarkan Arah Gaya Magnet

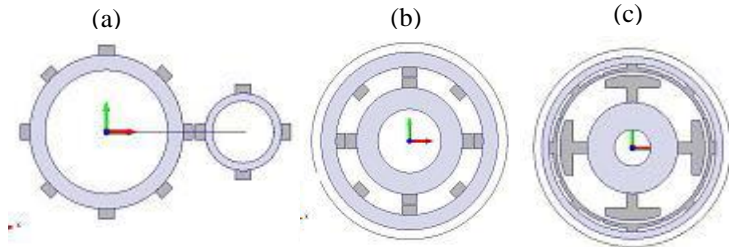
Berdasarkan arah gaya magnet, *magnetic gear* spur dibagi menjadi tipe radial dan tipe paralel seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. *Gear* dengan tipe radial pada *gear* spur merupakan model *gear* yang paling banyak digunakan. Biaya produksi *magnetic gear* tipe radial terkadang lebih mahal daripada *magnetic gear* dengan tipe paralel sehingga magnet paralel bisa menjadi alternatif. Namun, perhitungan analitis untuk *gear* paralel tidak ada pada literatur manapun sehingga dikembangkan analisis berdasarkan teori *gear* radial dengan magnetisasi axial.



Gambar 2.8 *Magnetic gear* Spur Tipe Radial Dan Tipe Paralel (Frank T. Jorgensen, 2010)

Teori yang digunakan dalam menganalisis spur *magnetic gear* yaitu modifikasi dari persamaan roda Furlani. Pada gambar 2.7 telah ditunjukkan bahwa terdapat *magnetic gear driving* dan *magnetic gear driven* yang akan digunakan dalam deskripsi teoritis. Terdapat dua penjelasan terhadap teori ini yaitu teori *Boundary Value Problem (BVP)* yang digunakan untuk mendapatkan penyelesaian medan ruang bebas untuk magnet sumber penggerak. Teori kedua yaitu pada magnet *drive* direduksi oleh distribusi kearpapatan medan magnet dan torsi dihitung dengan mempertimbangkan distribusi kerapatan arus pada medan magnet yang diberikan oleh magnet sumber penggerak. (Frank T. Jorgensen, 2010)

2.3.2 *Magnetic Spur Gear* berdasarkan Konfigurasi



Gambar 2.9 Beberapa Tipe Konfigurasi *Magnetic gear* Spur
(A) Permanent Magnetic Spur Gear, (B) Inner Type Spur Gear, (C) Salient Pole Type Spur Gear. (G.Muruganandam *et al*, 2012)

Terdapat tiga jenis konfigurasi yang bisa digunakan pada jenis *magnetic gear* spur. Katiga konfigurasi tersebut yaitu *permanent magnetic spur gear*, *inner type spur gear*, dan *salient pole type spur gear* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10

Pada konfigurasi (a) terdapat banyak gigi magnet yang tidak aktif dan tidak menghasilkan torsi yang berguna. Selain itu juga dibutuhkan lebih banyak ruang sebab menggunakan dua poros yaang membuat posisi *gear* saling bersampingan. Untuk memperbaiki fluks medan magnet agar lebih optimal dan mengurangi penggunaan ruang maka konfigurasi *gear* dibentuk seperti gambar (b). Dimana setiap fluks yang dihasilkan magnet akan berguna untuk meningkatkan torsi *gear*. Optimasi pemamfaatan ring modulator seperti pada gambar (c) menghasilkan kerja yang lebih efektif namun harus menggunakan analisis yang lebih rumit, konfigurasi ini yang selanjutnya dikenal dengan nama *Flux modulated magnetic gear (FEMM)*. (G.Muruganandam *et al*, 2012)

2.3.3 Kelebihan dan Kekurangan *Magnetic gear* dan *Mechanical gear*

Magnetic gear merupakan teknologi inovasi dari *mechanical gear*. Dari kedua jenis *gear* tersebut terdapat kelebihan dan kekurangan yang menjadi pembandingan antara keduanya. Perbandingan antara *magnetic gear* dan *mechanical gear* dapat dilihat pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Perbandingan *Magnetic gear* Dan *Mechanical gear* (Wang, 2015)

No	Kelebihan <i>Magnetic gear</i>	Kekurangan <i>Mechanical gear</i>
1	Tidak terjadi kontak antar roda gigi, sehingga tidak membutuhkan pelumasan, tidak ada gesekan sehingga tidak terjadi keausan, dan meminimalkan perawatan.	Terjadi kontak antar roda gigi, sehingga membutuhkan pelumasan, ada gesekan sehingga memungkinkan terjadinya keausan, dan membutuhkan perawatan.
2	Menghasilkan getaran dan suara yang relatif kecil	Menghasilkan getaran dan suara yang cukup besar
3	Menghasilkan gerak yang halus sehingga tidak terjadi <i>backlash</i> (<i>zero backlash</i>)	Menghasilkan gerak yang kurang halus sehingga terjadi <i>backlash</i>
4	Ketika terjadi slip tidak akan merusak sistem	Ketika terjadi slip dapat merusak sistem
5	Proses manufaktur lebih mudah	Proses manufaktur sulit
No	Kekurangan <i>Magnetic gear</i>	Kelebihan <i>Mechanical gear</i>
1	Torsi yang dihasilkan jauh lebih rendah dari <i>mechanical gear</i> untuk volume yang sama.	Torsi yang dihasilkan lebih besar dari <i>magnetic gear</i> untuk volume yang sama.
2	Mahal	Murah
3	Bahan baku agak susah didapatkan	Bahan baku lebih mudah didapatkan

Dari tabel 2.2 dapat dilihat kelebihan-kelebihan *magnetic gear* dibandingkan *mechanical gear*, hal tersebut menjadi

alasan kami mengambil judul TA tentang *magnetic gear* untuk dapat terus dikembangkan sebagai energi terbarukan.

2.4 Bahan Magnetic

Material magnetik adalah material yang banyak digunakan sejak dulu sehingga perkembangannya sangat cepat dan menghadirkan material-material yang lebih baik. Material-material tersebut merupakan magnet permanen antara lain adalah ferit, alnico, dan samarium cobalt. Pada tahun 1980 ditemukan magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan kekuatan magnet yang tinggi, lalu mulai dikomersilkan sejak tahun 1984.

2.4.1 Jenis-Jenis Material Magnet Permanen

1. *Ferit Magnet*

Ferrite adalah senyawa kimia yang terdiri dari keramik bahan dengan besi (III) oksida (Fe_2O_3) sebagai komponen utama. Bahan ini digunakan untuk membuat magnet permanen, seperti *core* ferit untuk transformator, dan berbagai aplikasi lain. Ferit keras banyak digunakan dalam komponen elektronik, diantaranya motor-motor DC kecil, pengeras suara (*loud speaker*), meteran air, KWH-meter, *telephone receiver*, *circulator*, dan *rice cooker*. (Ruoho, 2007)



Gambar 2.10 Magnet Keramik

2. *Alnico Magnet*

Alnico magnet adalah magnet paduan yang mengandung Aluminium (Al), Nikel (Ni), Cobalt (Co). Karena dari tiga unsur tersebut magnet ini sering disebut

Alnico. Sebenarnya magnet alnico ini tidak hanya mengandung ketiga unsur saja melainkan ada beberapa unsur mengandung besi dan tembaga, tetapi kandungan besi dan tembaga tersebut relatif sedikit. Alnico magnet dikembangkan pada tahun 1930-an dengan metode *sintering* atau lebih umum disebut metode *casting*.

Jenis magnet ini dapat ditemukan di dalam alat-alat motor (kipas angin, *speaker*, dan mesin motor). Magnet ini juga sering dijumpai dalam lab sekolah bahkan dapat ditemukan pada sepatu kuda yang berfungsi untuk meningkatkan daya lari kuda. Magnet ini kekuatannya relatif sedang dan kemampuan terapinya sangat lemah dan tidak dianjurkan untuk digunakan dalam terapi magnet. Magnet ini adalah magnet yang masih termasuk kategori berenergi rendah. (Ruoho, 2007)

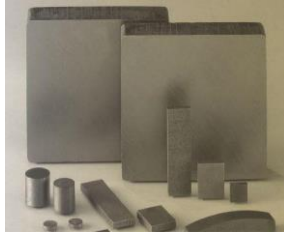


Gambar 2.11 Magnet Alnico

3. Samarium-Cobalt Magnet

Magnet Samarium-Cobalt adalah salah satu dari dua jenis magnet bumi yang langka, merupakan magnet permanen yang kuat yang terbuat dari paduan samarium dan kobalt. Mereka dikembangkan pada awal tahun 1970. Mereka umumnya-terkuat kedua jenis magnet dibuat, kurang kuat dari magnet neodymium, tetapi memiliki peringkat temperatur yang lebih tinggi dan lebih tinggi koersivitas. Mereka rapuh dan rawan terhadap retak dan *chipping*. Samarium-kobalt magnet memiliki produk-produk energi maksimum (BH max) yang berkisar dari 16

oersteds megagauss-(MGOe) menjadi 32 MGOe; batas teoretis mereka adalah 34 MGOe. Jenis magnet ini dapat ditemukan di dalam alat-alat elektronik seperti VCD, DVD, VCR *player*, *handphone*, dan lain-lain. (Ruoho, 2007)



Gambar 2.12 Samarium-Cobalt magnet

4. Neodymium Magnet

Magnet neodymium merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet neodymium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo) merupakan sejenis magnet tanah jarang yang terbuat dari Neodymium Alloy, Iron, dan Boron membentuk dengan Rumus Kimia $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ *Tetragonal Crystalline Structure*. Tetragonal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ memiliki struktur kristal yang sangat tinggi uniaksial anisotropi *magnetocrystalline* ($H_A \sim 7$ Tesla). Senyawa ini memberikan potensi untuk memiliki koersivitas (ketahanan mengalami kerusakan magnetik) tinggi. Bahan magnet ini yang digunakan penulis dalam melakukan penelitian.



Gambar 2.13 Neodymium Magnet

Sinter $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet sinter. Masalah ini dibahas dalam banyak produk komersial dengan menyediakan lapisan pelindung. Pelapisan nikel atau dua pelapisan tembaga berlapis nikel digunakan sebagai metode standar, meskipun pelapisan dengan logam lainnya atau polimer dan lapisan pelindung pernis juga digunakan. (Ruoho, 2007)

2.4.2 Kelebihan dan Kekurangan Jenis-Jenis Magnet

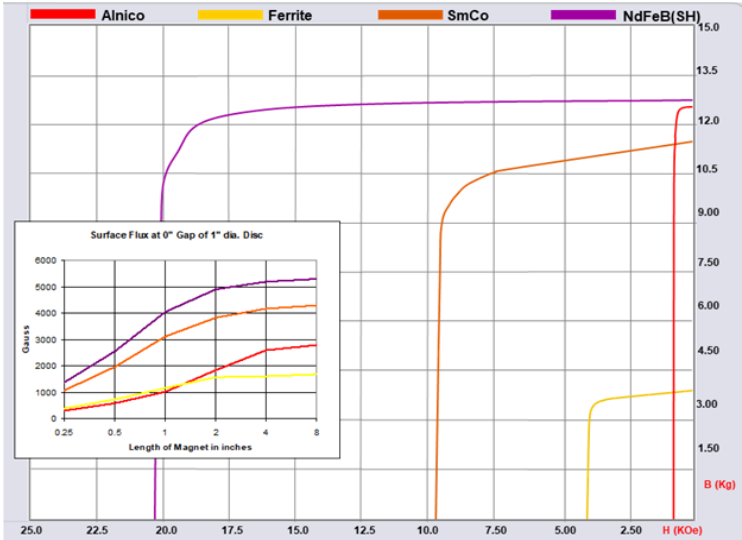
Dari beberapa jenis magnet yang telah dijelaskan diatas, terdapat kelebihan dan kekurangan dari berbagai jenis magnet yang menjadi pembeda antara magnet satu dan magnet yang lain. Perbedaan inilah yang menjadi alasan dalam menentukan jenis magnet mana yang akan digunakan dalam penelitian ini. Kelebihan dan kekurangan magnet tersebut dapat dilihat pada table 2.3.

Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan Jenis-Jenis Magnet

No	Jenis Magnet	Kelebihan	Kekurangan
1	Ferrit magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki banyak kegunaan • Tahan korosi 	<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki Br rendah • Membutuhkan alat • Bentuk sederhana
2	Alnico magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Mengandung Br yang tinggi • Dapat bekerja pada T tinggi • Koefisien T tinggi • Bentuk yang kompleks 	<ul style="list-style-type: none"> • Mengandung Hc yang rendah • Biaya mahal • Membutuhkan peralatan • Susah ditemukan di pasaran
3	Samarium-cobalt magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Tahan korosi • Temperatur dan koersivitas lebih tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Sangat mahal • Bentuknya sederhana • Mengandung cobalt yang tinggi

		dibandingkan Neodymium <ul style="list-style-type: none"> • Tidak membutuhkan pengerjaan tambahan • Koefisien T sangat rendah • Stabil 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapuh dan rawan terhadap retakdan <i>chipping</i>
4	Neodymium magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Koersivitas tinggi • Magnet permanen yang paling kuat • Tidak membutuhkan pengerjaan tambahan • Mudah ditemukan • Harga terjangkau 	<ul style="list-style-type: none"> • Rentan terhadap korosi • Hanya bekerja pada T rendah

Nilai koersivitas (H) suatu material magnet permanen akan mempengaruhi besarnya nilai medan magnet (B) yang akan dihasilkan. Pada gambar 2.15 dapat dilihat bahwa permanen magnet berjenis Neodymium memiliki nilai koersivitas (H) dan menghasilkan medan magnet (B) yang paling tinggi. Oleh karena itu, material berjenis Neodymium digunakan dalam Tugas Akhir ini karena material jenis ini yang paling cocok untuk digunakan. Dari Tabel 2.3 juga dapat dilihat perbandingan antar jenis material magnet permanen dilihat dari temperatur (T), medan magnet (B) yang dihasilkan, nilai koersiviti (H), dan *energy density* maksimum (BH) setiap bahan. Material Neodymium memiliki medan magnet (B), nilai koersiviti (H), dan *energy density* maksimum (BH) paling tinggi dibandingkan dengan yang lain, tetapi dapat bekerja pada temperatur (T) paling rendah.



Gambar 2.14 Sifat Kemagnetan Magnet Permanen (Manaf, 2000)

Pada tesis (Sadra Mousavi, 2015) telah dilakukan perbandingan roda gigi magnet dengan menggunakan tipe magnet yang berbeda-beda yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.4 Sifat Kemagnetan Intrinsik Masing-Masing Jenis Magnet Permanen

Jenis magnet	Tc (°C)	B (T)	H (MA/m)	(BH) _{max} (kJ/m ³)
Ba Fe ₁₂ O ₁₉	450	0,50	1,10	50
Sr Fe ₁₂ O ₁₉	450	0,48	1,50	46
Sm ₂ Co ₁₇	840	1,25	5,20	312
Sm Co ₅	720	1,14	20-35	260
Nd ₂ Fe ₁₄ B	312	1,60	5,40	512

Tabel 2.5 Perbandingan Roda Gigi Magnet Dengan Tipe Magnet Berbeda

Magnetic gears	Steady state analysis at 330/60 min ⁻¹	Static analysis outer rotor rotates at 60 min ⁻¹
Surface mounted MG using NdFeB	97.09/17.6 N.m	283.07/51.46 N.m
Surface mounted MG using SmCo	77.49/14.08 N.m	228.03/41.46 N.m
Surface mounted MG using Alnico	10.15/1.86 N.m	47.14/8.5 N.m

Dari tabel diatas terlihat bahwa alnico adalah magnet bumi langka paling lemah dan NdFeB adalah yang terkuat. Setelah beberapa penelitian tentang harga magnet di pasar dunia, diketahui bahwa harga Alnico adalah 20 \$ / Kg, harga SmCo adalah 70 \$ / Kg dan harga NdFeB 35 \$ / Kg (Tabel 2.2).

Tabel 2.6 Perbandingan Biaya Relatif Magnet

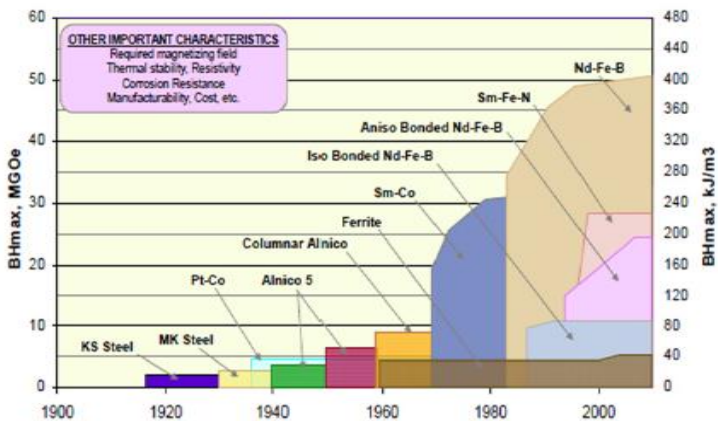
Type	BH _{max}	\$/kg	\$/BH _{max}
Alnico 9	5	20 \$	4 \$
SmCo	25	70 \$	2.8 \$
NdFeB	40	35 \$	0.88 \$

SmCo adalah jenis magnet yang mahal dan tidak sekuat NdFeB, sehingga menurut informasi pada Tabel 2.2 NdFeB adalah jenis magnet yang paling ekonomis. Oleh karena itu lebih baik menggunakan Neodymium dalam *magnetic gear* karena kuat dan harganya ekonomis.

2.4.3 Jenis Magnet yang digunakan (NdFeB)

NdFeB adalah material magnetik jenis permanen logam tanah jarang (rare earth). Disebut material rare earth karena terbentuk oleh dua atom dari suatu unsur logam tanah jarang Neodymium (Nd), 14 atom besi (Fe), dan 1 atom Boron (B). Sifat magnet yang dimiliki NdFeB sangat baik bila dibandingkan dengan magnet permanen lainnya seperti Ferit, Alnico, dan Samarium Cobalt. BH_{max} yang dimiliki magnet

NdFeB adalah berkisar antara 30-50 Mega Gauss Oersred (MGOe) atau 240-400 kJ/m³. Perbandingan kekuatan magnet NdFeB dan material lainnya dapat dilihat pada gambar 2.16 (N. Idayanti & Dedi, 2006)



Gambar 2.15 Perbandingan Kekuatan Magnet Permanen

Sifat fisik magnet NdFeB adalah seperti pada tabel 2.7 dibawah ini:

Tabel 2.7 Sifat Magnet NdFeB (NdFeB Datasheet, Eclipse Magnetics)

Characteristic	Symbol	Unit	Value
Density	D	g/cm	7.3-7.5
Relative Permeability	Mu		1.05
Vickers Hardness	Hv	D.P.N	570
Compression Strength	C.S	N/mm ²	780
Coefficient of Thermal Expansion	C//	10-6/°C	3.4
	CL	10-6/°C	-4.8
Electrical Resistivity	p	μ Ω.cm	150

<i>Temperature coefficient of resistivity</i>	α	$10^{-4}/^{\circ}\text{C}$	2
<i>Electrical Conductivity</i>	σ	10^6S/m	0.667
<i>Thermal Conductivity</i>	k	$\text{kCal}/(\text{m.h.}^{\circ}\text{C})$	7.7
<i>Specific Heat Capacity</i>	c	$\text{kCal}/(\text{kg.}^{\circ}\text{C})$	0.12
<i>Tensile Strength</i>	$\sigma_{\text{UTS, or } S_{\text{U}}}$	kg/mm^2	8
<i>Young's Modulus</i>	λ / E	10^{11} N/m^2	1.6
<i>Flexural Strength</i>	β	$10\text{-}12 \text{ m}^2/\text{N}$	9.8
<i>Compressibility</i>	σ	$10\text{-}12 \text{ m}^2/\text{N}$	9.8
<i>Rigidity</i>	E.I	N/m^2	0.64
<i>Poisson's Ratio</i>	ν		0.24
<i>Curie Temperature</i>	T_{c}	$^{\circ}\text{C}$	310

Magnet NdFeB diproduksi dengan menggunakan standar ISO9001 dan ISO14001 *Quality Control Standart*. Terdapat banyak versi dari magnet NdFeB yang dikodefikasi dengan spesifikasi berbeda berdasarkan kebutuhan penggunaannya seperti kekuatan, temperatur operasi, dan lain-lain. Kodefikasi magnet tersebut dapat dilihat pada *Magnets Datasheet* yang terdapat pada lampiran.

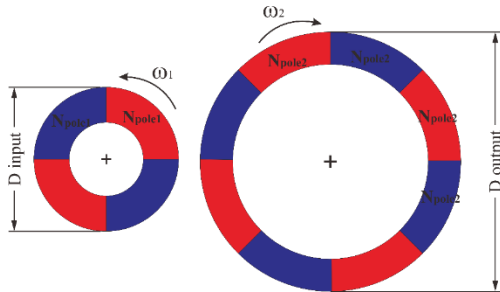
Magnet NdFeB mudah didemagnetisasi pada temperatur tinggi, ini artinya sifat kemagnetannya mudah hilang pada temperatur tinggi. Namun sifat kemagnetannya akan meningkat pada temperatur rendah. Pada tabel 2.7 dapat dilihat bahwa temperatur operasinya berada diantara $80^0 - 200^0 \text{ C}$. Hal lain yang mempengaruhi ketahanan magnet terhadap temperatur yaitu geometri. Magnet dengan bentuk yang lebih tipis akan lebih mudah didemagnetisasi daripada magnet yang tebal. Bentuk magnet piring datar dan yokes lebih direkomendasikan untuk digunakan pada temperatur yang tinggi. (N. Idayanti & Dedi, 2006)

2.5 Rasio Gear dan Jumlah Gigi Magnet

Pada gambar 2.4, telah ditunjukkan bahwa dalam sepasang magnetic spur gear terdapat rotor *driving* atau rotor berkecepatan tinggi (Hs) dan rotor *driven* atau rotor berkecepatan rendah (Ls). Perbandingan putaran antara dua gear tersebut (*Gear ratio/Gr*) ditentukan berdasarkan jumlah gigi pada rotor ataupun diameter pada rotor. Sebagian besar sistem gear memiliki rasio gear lebih besar dari satu yang sesuai dengan putaran rotor berkecepatan tinggi dan rotor berkecepatan rendah. Gear rasio dengan melihat hubungan jumlah gigi magnet dan kecepatan putaran ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$G_r = \left(\frac{N_{pole1}}{N_{pole2}} \right) = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \quad (2.9)$$

G_r : Gear rasio
 N_{pole} : Jumlah gigi magnet
 ω : Kecepatan putaran (rpm)



Gambar 2.16 Desain *Magnetic gear*

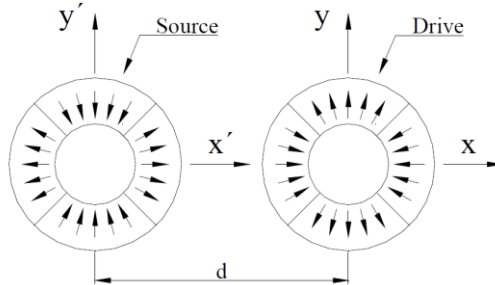
Gear rasio juga dapat didefinisikan dengan membandingkan diameter dari kedua rotor magnet. Perbandingan diameter tersebut akan mendefinisikan kecepatan putaran yang dihasilkan oleh gear bergerak berdasarkan input kecepatan putaran

yang diberikan oleh sumber tenaga. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.17 (Yudhu Raj *at al*, 2016)

$$G_r = \left(\frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} \right) = \left(\frac{D_{output}}{D_{input}} \right) \quad (2.10)$$

G_r : Gear rasio
 ω : Kecepatan putaran (rpm)
 D : Diameter rotor

2.6 Torsi *Magnetic gear*



Gambar 2.17 Sketsa *Source* Dan *Drive* Magnet untuk Radial *Magnetic gear*

Pada gambar 2.16 menunjukkan *source* magnet dan *drive* magnet yang mana digunakan dalam diskripsi teoritikal. Penjelasan teori tersebut dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama yaitu teori *Boundary Value Problem* (BVP) dimana digunakan untuk mendapatkan bidang ruang bebas pada *source* magnet. Pada bagian kedua perhitungan *drive* magnet diuraikan menjadi *current density* yang ekuivalen dan torsi dihitung dengan mempertimbangkan distribusi *current density* dibawah pengaruh medan eksternal dari *source* magnet.

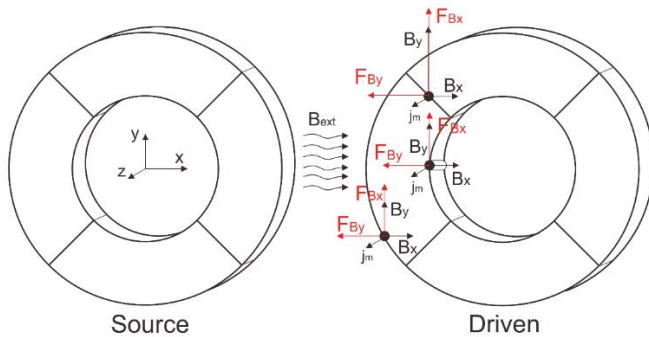
Bidang ruang bebas adalah subjek yang agak rumit, itulah sebabnya mengapa topik ini dijelaskan dibagian terpisah. Hasil penting dari bagian ini adalah untuk dapat menunjukkan fluks

medan magnet B sebagai fungsi koordinat posisi. Penyelesaian bidang ruang bebas didefinisikan untuk *source magnet*, sedangkan *drive magnet* tidak memiliki pengaruh terhadap penyelesaian tersebut oleh karena itu permeabilitas relatif diasumsikan menjadi satu. Langkah terakhir dari penyelesaian tersebut yaitu mentransformasikan medan fluks magnetik B yang didefinisikan ke dalam sistem koordinat *drive magnet*, dimana torsi akan dihitung. *Drive magnet* kemudian diuraikan menjadi distribusi *current density* yang ekuivalen. *Current density* terdapat pada permukaan luar setiap kutub magnet di sisi *drive magnet*. Selama *current density* terjadi dipermukaan, maka dinyatakan dalam persatuan jarak pada permukaan. Pada bagian terakhir, torsi pada akhirnya akan dihitung dengan dilakukannya integrasi di sepanjang *drive magnet*. Integrasi torsi dilakukan dengan mempertimbangkan fluks medan magnet B dari *source magnet* dan *current density* dari *drive magnet* yang kemudian akan digunakan untuk menghitung torsi.

Untuk menentukan torsi pada *drive magnet*, hal pertama yang dilakukan adalah mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *current densities* volume dan permukaan (J_m dan j_m). Persamaan torsi terdiri atas dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet. (F.T. Jorgensen, 2010)

$$T = \int_V \mathbf{r} \times (J_m(r, \emptyset) \times B_{ext}) r dr d\emptyset dz + \int_S \mathbf{r} \times (j_m \times (2.11))$$

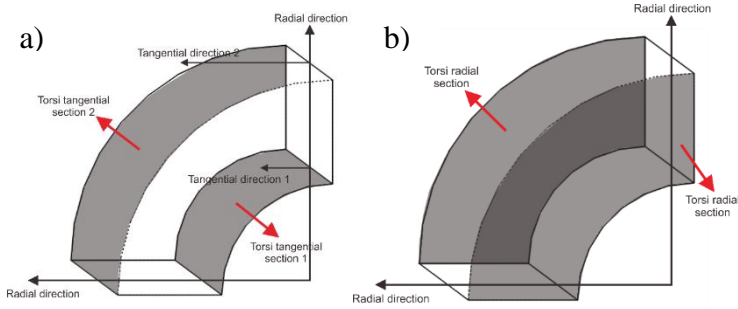
dimana T : torsi (Nm)
 r : vector jarak ke arah radial
 J_m : *volume current density* (A/m²)
 j_m : *surface current density* (A/m)
 B_{ext} : *external flux density field* (Wb)



Gambar 2.18 Ilustrasi Arah Current, Bext, dan Gaya

Dikarenakan current density yang terjadi pada inti/volume sangat kecil $\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} = 0$, maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integral permukaan. Semua *current density* \mathbf{j}_m pada permukaan harus dilalui oleh \mathbf{B}_{ext} dari *source magnet* untuk menciptakan torsi pada *drive magnet*. Artinya \mathbf{B}_{ext} pada magnet source akan saling silang dengan current \mathbf{j}_m pada driven magnet lalu menghasilkan gaya dan torsi. Perkalian *cross* tersebut dapat diilustrasikan dengan sketsa isometrik pada gambar 2.18.

Gaya yang timbul akibat persilangan antar current \mathbf{j}_m dan \mathbf{B}_{ext} akan menghasilkan torsi terhadap sumbu z . Hal tersebut juga berlaku pada semua titik current pada sisi permukaan batang magnet yang sama sehingga dilakukan integrasi untuk mendefinisikan torsi yang timbul akibat gaya tersebut. Terdapat dua integrasi pada perhitungan torsi yaitu, integrasi permukaan radial dan integrasi permukaan tangensial. Integrasi radial dilakukan pada arah radial dari bidang permukaan magnet. Sedangkan integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan yaitu sisi bagian dalam dan sisi bagian luar. Ilustrasi integrasi sisi radial dan dua sisi tangensial dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Ilustrasi (a) Sisi Integrasi Tangensial dan (b) Sisi Integrasi Radial

Persamaan untuk torsi radial didapatkan dengan menggunakan metode integrasi Simpson. Berikut adalah persamaan torsi radial.

$$\begin{aligned}
 & \text{Tr}(\emptyset) \\
 &= \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_d}\right) L(R_2 - R_1)}{N_r} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_s} (-1)^p S_r(q) r(q) \\
 & \times \left[\cos\left(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}\left(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset, p)\right)\right) \right] \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

dimana $\text{Tr}(\emptyset)$: torsi radial (Nm)
 M_s : magnetisasi *source magnet* (A/m)
 N_s : jumlah magnet pada *source magnet gear*
 N_d : jumlah magnet pada *drive magnet gear*
 N_r : *radial mesh coefficient*
 L : panjang/tinggi magnet (m)
 R_1 : radius dalam *drive magnet* (m)
 R_2 : radius luar *drive magnet* (m)
 p : jumlah kutub magnet
 q : parameter dari integrasi
 $S_r(q)$: parameter dari integrasi simpson

- \emptyset_{edge} : sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 \emptyset : sudut putar *drive magnet* (rad)
 B_x^{ext} : *x-direction external flux density field* (Wb)
 B_y^{ext} : *y-direction external flux density field* (Wb)

Sedangkan untuk integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan. Untuk mendapatkan hasilnya digunakan metode integrasi Simpson. Berikut adalah persamaan torsi tangensial.

$$\begin{aligned}
 & T_{t1}(\emptyset) \\
 &= \frac{M_S L R_1^2 \left(\frac{2\pi}{N_d}\right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos(\theta(q) \right. \\
 &+ p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset) B_x^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \\
 &+ \sin \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \left. \right] \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & T_{t2}(\emptyset) \\
 &= - \frac{M_S L R_2^2 \left(\frac{2\pi}{N_d}\right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos(\theta(q) \right. \\
 &+ p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset) B_x^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \\
 &+ \sin \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \left. \right] \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

- dimana $T_t(\emptyset)$: torsi tangensial (Nm)
 M_S : magnetisasi *source magnet* (A/m)
 N_t : parameter integrasi torsi
 N_d : jumlah magnet pada *drive magnet gear*
 L : panjang/tinggi magnet (m)
 R_1 : radius dalam *drive magnet* (m)

- R_2 : radius luar *drive magnet* (m)
 p : jumlah kutub magnet
 q : parameter dari integrasi
 $S_r(q)$: parameter dari integrasi simpson
 θ : sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 \emptyset : sudut putar *drive magnet* (rad)
 B_x^{ext} : *x-direction external flux density field* (Wb)
 B_y^{ext} : *y-direction external flux density field* (Wb)

Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan. Berikut adalah persamaannya.

$$T(\emptyset) = T_r(\emptyset) + T_{t1}(\emptyset) + T_{t2}(\emptyset) \quad (2.14)$$

- dimana $T(\emptyset)$: torsi total (Nm)
 $T_r(\emptyset)$: torsi radial (Nm)
 $T_{t1}(\emptyset)$: torsi tangensial dalam (Nm)
 $T_{t2}(\emptyset)$: torsi tangensial luar (Nm)

2.6.1 Perhitungan Drive Magnet Surface Current Density

Kesetimbangan *surface current density* adalah distribusi *current density* yang memberikan medan magnet yang sama seperti magnet permanen. Persamaan *current density* untuk permukaan luar dan dalam adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 j_m(p, r, \phi, \theta) &= M_s \sin(\theta) \hat{z}, r = R_2 \\
 j_m(p, r, \phi, \theta) &= -M_s \sin(\theta) \hat{z}, r = R_1 \\
 \phi - \frac{\pi}{N_d}(1 + 2p) &\leq \theta \leq \phi + \frac{\pi}{N_d}(1 + 2p)
 \end{aligned} \quad (2.16)$$

- dimana j_m : *surface current density* (A/m²)
 M_s : magnetisasi *source magnet* (A/m)
 θ : sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 \hat{z} : vector jarak ke arah z

2.6.2 Perhitungan External *Flux density Field*

Berikut adalah persamaan untuk B_x^{ext} dan B_y^{ext} pada *drive magnet* yang dihasilkan dari medan *source magnet*.

$$\begin{aligned} B_x^{ext}(r, \phi) &= B_{r'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \cos(\phi'(r, \phi))) \\ &- B_{\phi'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \sin(\phi'(r, \phi))) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} B_y^{ext}(r, \phi) &= B_{r'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \cos(\phi'(r, \phi))) \\ &- B_{\phi'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \sin(\phi'(r, \phi))) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dimana B_x^{ext} : *x-direction external flux density field* (Wb)
 B_y^{ext} : *y-direction external flux density field* (Wb)
 $B_{r'}^{ext}$: *radial external flux density field* (Wb)
 $B_{\phi'}^{ext}$: *tangential external flux density field* (Wb)
 r' : transformasi radius ke koordinat *drive magnet*
 Φ' : transformasi tangensial ke koordinat *drive magnet*

2.6.3 Perhitungan Magnetisasi Paralel

Magnetisasi paralel terdapat pada arah radial dan tangensial. Berikut adalah persamaan untuk mendapatkan magnetisasi paralel. (F.T. Jorgensen, 2010)

$$M_s(r, \phi) = M_{r'} \cdot \hat{r} + M_{\phi} \cdot \hat{\phi} \quad (2.19)$$

dimana M_r : magnetisasi arah radial (A/m)
 M_{ϕ} : magnetisasi arah tangensial (A/m)

2.7 Software Analisis

Finite element analysis (FEA) telah digunakan untuk mensimulasikan variasi pergerakan roda gigi yang berbeda. Maxwell oleh Ansoft dan FEMM, digunakan dalam proyek ini.

Maxwell dan FEMM menggunakan metode kerja virtual untuk menghitung torsi untuk benda bergerak dalam simulasi transiennya. Ansoft maxwell, juga, adalah salah satu program hebat untuk analisis elektromagnetik 2D dan 3D. Dengan menggunakan maxwell *package* kita dapat menghitung medan listrik statis, gaya, torsi, dan kapasitansi yang disebabkan oleh distribusi dan muatan voltase, medan magnet Statis, gaya, torsi, dan induktansi yang disebabkan oleh arus DC, medan magnet eksternal statis, dan magnet permanen, variasi waktu medan magnet, gaya, torsi, dan impedansi yang disebabkan oleh arus AC dan medan magnet eksternal yang berosilasi dan medan magnet transien yang disebabkan oleh sumber listrik dan magnet permanen.

2.8 Penelitian Terdahulu



Gambar 2.20 (a) Bentuk Material Gear, (b) Prototype Sistem *Magnetic gear* (Yudhu Raj *et al*, 2016)

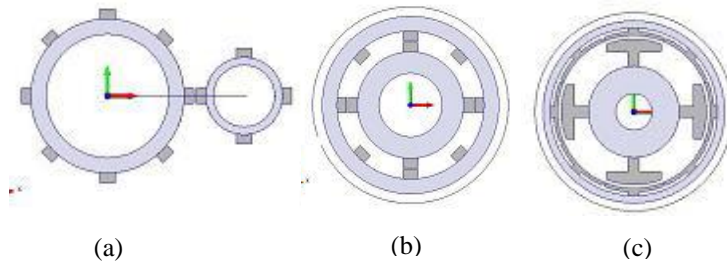
Yudhu Raj dkk (2016), dalam penelitiannya melakukan eksperimen dengan mengaplikasikan *magnetic gear* ke dalam *gearbox* yang selanjutnya disebut dengan nama *permanent magnet machines*. Eksperimen ini dilakukan dengan maksud ingin membuktikan bahwa *magnetic gear* mampu menjadi solusi atas kegagalan-kegagalan yang terjadi pada *mechanical gear* seperti gesekan kontak, kebisingan, panas, dan getaran. Lalu dilakukan uji coba dengan menggunakan magnet batang yang dipasang ke dalam piringan logam seperti pada gambar 2.20. Penelitian tersebut menggunakan dua buah *gear*, *gear* pertama berdiameter dalam 42mm dan diameter luar 52mm, sedangkan *gear* kedua

berdiameter dalam 35mm dan diameter luar 45mm lalu dipasangkan dengan *air gap* sebesar 3mm. Putaran dihasilkan oleh motor AC dengan kecepatan putaran 1440rpm lalu didapatkan *maximum load* sebesar 66 N.

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Yudhu Raj dkk, dapat disimpulkan bahwa *magnetic gear* mampu memberikan kecepatan dan torsi yang hampir mirip dengan mekanisme transmisi *mechanical gear*, tetapi dengan memanfaatkan gaya tarik magnet, bukan dari kontak fisik seperti yang terjadi pada *mechanical gear*. *Magnetic gear* diunggulkan dari sisi lubrikasi karena dalam aplikasinya penggunaan pelumasan mampu dikurangi atau dihilangkan dibandingkan dengan *mechanical gear*. Penggunaan *magnetic gear* juga dapat meningkatkan keandalan karena resiko kerusakan akibat kontak fisik seperti kebisingan, panas, dan getaran dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan.

G Muruganandam dkk (2012), melakukan penelitian dengan tujuan untuk membuktikan pengaruh perbedaan desain topologi *magnetic gear* dan bahan magnet yang digunakan terhadap performa *magnetic gear*. Topologi *magnetic gear* yang digunakan yaitu *magnetic gear* eksternal, *magnetic gear* internal dan *magnetic gear* tipe salinet pole seperti pada gambar 2.21. Sedangkan bahan magnet yang digunakan yaitu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ dan NdFeB . Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi analisis *finite element* untuk mendapatkan torsi dan kerapatan medan magnet yang dihasilkan *magnetic gear*.

Geometri yang digunakan pada penelitian yang dilakukan G Muruganandam dkk adalah seperti pada tabel 2.8 yang dipasangkan dengan *air gap* sebesar 1mm. Geometri spur gear tersebutlah yang menjadi acuan bagi penelitian ini, dimana diameter dari rotor divariasikan untuk mendapatkan performa gear yang lebih baik.



Gambar 2.21 (a) Permanent Magnetic Spur Gear, (b) Inner Type Spur Gear, (c) Salient Pole Type Spur Gear.
(G.Muruganandam *et al*, 2012)

Tabel 2.8 Geometri Magnetic gear (G.Muruganandam *et al*, 2012)

Description	Units	Spur Gear	Inner type spur Gear	Salient pole type spur Gear
No of low speed rotor poles	-	8	8	8
Outer radius of low speed rotor	mm	28	30	25
Inner radius of low speed rotor	mm	20	21.75	21
No of high speed rotor poles	-	4	4	4
Outer radius of high speed rotor	mm	15.5	10	20
Inner radius of high speed rotor	mm	10	12.5	12.5
Length of the magnetic material	mm	100	100	100
Air gap length	mm	1	1	1
Permanent Magnet material	-	NdFeB & Sm ₂ CO ₁₇		
Permeability of air region (μ_0)	Tm/A	$4\pi \times 10^{-7}$		
Relative permeability of magnets $\mu_r = \mu / \mu_0$	-	1.0523		
Max torque	N.m	6	22.5	30

Tabel 2.9 Hasil Penelitian G Muruganandam (G.Muruganandam *et al*, 2012)

Types of Magnetic gear	Sm ₂ Co ₁₇	NdFeB
Torque in Spur Gear (Nm)	5,3	6
Torque in Inner Spur Gear (Nm)	21,7	22,5
Torque in Salient Pole type Spur Gear (Nm)	28,8	30,0

Dari penelitian tersebut lalu didapatkan hasil bahwa desain topologi dengan performa (torsi dan rapat medan magnet) yang terbaik yaitu topologi spur *gear* tipe *pole salient*. Sedangkan bahan magnet dengan performa yang paling baik adalah NdFeB. Hasil dari penelitian dapat dilihat pada tabel 2.9.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas metode penelitian yang digunakan, metode penelitian yang digunakan yaitu metode analisis *finite element* menggunakan piranti lunak *electromagnetic* untuk menganalisis kuat medan magnet dan torsi yang dihasilkan *magnetic gear*. Perhitungan menggunakan metode ini dilakukan dengan beberapa asumsi dan variasi yang akan dijelaskan pada variabel yang digunakan pada penelitian ini.

Secara umum, metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari serta mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan tema penelitian, seperti mengumpulkan informasi berupa artikel ilmiah, jurnal, *text book*, serta hasil penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya.

2. Simulasi

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *air gap* dan dimensi ketebalan batang magnet pada *magnetic gear* terhadap kuat medan magnet dan torsi *magnetic gear*. Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

3. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan yang terdiri atas pendahuluan, tinjauan pustaka, dan metodologi penelitian.

3.1 Variabel Penelitian

3.1.1 Variable Bebas

1. Ketebalan batang magnet.

Dimensi *gear* magnet terdiri dari diameter luar, diameter dalam dan panjang batang magnet. Ketebalan batang magnet divariasikan tanpa mengubah diameter

luar, hal ini dilakukan dengan cara mengubah diameter dalam rotor *gear*. Diameter dalam rotor HS dan diameter dalam rotor LS divariasikan dengan besaran yang telah diatur pada tabel 3.2

2. Besar jarak *air gap*.

Air gap adalah ruang hampa yang berada diantara HS rotor dan LS rotor yang akan divariasikan menjadi 1 mm; 2 mm; dan 3 mm.

3.1.2 Variable Terkontrol

1. Rasio *magnetic gear* dan jumlah pole magnet

Penentuan rasio *magnetic gear* dan jumlah pole magnet mengacu pada penelitian sebelumnya. Rasio *magnetic gear* yang digunakan yaitu 1:2 dengan jumlah pole magnet 4:8.

2. Volume *magnetic gear*

Volume *magnetic gear* yang dimaksud merupakan volume yang dibutuhkan oleh rotor HS dan rotor LS dimana volume tersebut ditentukan oleh diameter luar dan panjang rotor. Diameter luar HS rotor yaitu 15,5 mm dan LS rotor yaitu 28 mm. Sedangkan panjang batang magnet yang merupakan panjang silinder rotor *magnetic gear* ditetapkan dengan nilai 100 mm untuk rotor HS maupun rotor LS.

3. Kecepatan putar rotor driver

Kecepatan putar yang diberikan pada simulasi sebagai kecepatan putaran awal rotor driver yaitu sebesar 60 rpm atau 360°/s

3.2 Peralatan Penelitian

3.2.1 Spesifikasi *Magnetic gear*

Penelitian dengan simulasi menggunakan metode analisis *finite element* ini dilakukan pada desain topologi *radial external spur gear*. Tipe *external spur gear* dipilih karena bentuk tersebut sangat sesuai jika ingin memvariasikan ketebalan batang magnet tanpa mempengaruhi diameter luar

dan besar *air gap*, berbeda dengan tipe lainnya yang mana perubahan pada ukuran ketebalan batang magnet akan memberi perubahan pula pada dimensi lain seperti besar *air gap* dan besar volume luar. Menurut Frank T. Jorgensen (2010), *gear spur* dengan tipe radial merupakan model *gear* yang paling banyak digunakan untuk menganalisis *magnetic gear*. Hal ini dikarenakan *gear* tipe tersebut lebih optimal dari tipe parallel sehingga tidak ada satupun literatur yang menggunakan analisis dengan tipe parallel. Lalu dipilihlah arah gaya magnet *radial* pada penelitian ini.

Spesifikasi *magnetic gear* dapat dilihat pada tabel 3.1. Dimensi yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh G.Muruganandam

Tabel 3.1 Dimensi dan Karakteristik *Magnetic gear*

Deskripsi	Besaran	Satuan
Jumlah pole HS rotor	4	-
Diameter luar HS rotor	15,5	mm
Diameter dalam HS rotor	divariasikan	
Jumlah pole LS rotor	8	-
Diameter luar LS rotor	28	mm
Diameter dalam LS rotor	divariasikan	
Panjang material magnet	100	mm
Permeabilitas ruang (μ_0)	$4\pi \times 10^{-7}$	Tm/A
Bahan magnet	NdFeB35	

3.2.2 Perangkat Lunak

Pemodelan *magnetic gear* dan analisis perhitungan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak sebagai berikut:

1. SolidWorks

Solidwork merupakan program perangkat lunak yang mampu digunakan dalam membuat desain baik dalam bentuk 2 dimensi maupun 3 dimensi.

Program ini digunakan untuk melakukan pemodelan 3 dimensi terhadap *magnetic gear*.

2. FEMM (*Finite Element Method Magnetic*)

FEMM merupakan program perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan analisis hubungan antara B (kerapatan medan magnet) dan H (kuat medan magnet) dengan metode analisis 2D *finite element*. Program ini digunakan untuk menampilkan distribusi kerapatan medan magnet B.

3. ANSYS *Electronics*

Ansys electronic merupakan program perangkat lunak yang mampu melakukan analisis 3D *finite element* terhadap bahan magnetik. Program ini digunakan dalam melakukan simulasi terhadap desain *magnetic gear* untuk mengetahui performa *magnetic gear* tersebut.

3.3 Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian meliputi studi literatur, *pre processing*, *processing* dan *post processing*.

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan tujuan mengetahui dan memahami hal-hal mengenai:

1. Perkembangan *magnetic gear* dan penelitian-penelitian terdahulu mengenai *magnetic gear*.
2. Sifat dan karakteristik magnet.
3. Hubungan antara dimensi *magnetic gear*, kerapatan medan magnet (B), kuat medan magnet (H), dan torsi maksimum *magnetic gear*.
4. Metode analisis *finite element*

3.3.2 Pre-Processing dengan Menggunakan SolidWork 2014

Tahap *pre-processing* merupakan tahap pemodelan 3 dimensi dilakukan dengan menggunakan bantuan *software*

SolidWork. Pembuatan desain dilakukan sebanyak 3 kali untuk HS rotor dengan diameter luar 15,5 mm dan diameter dalam yang divariasikan, lalu LS rotor dengan diameter luar 28 mm dan diameter dalam yang divariasikan.

Setiap variasi dari HS rotor dan LS rotor akan saling dipasangkan untuk dianalisis dengan metode 3D *finite element*. Variasi dari diameter dalam tiap rotor dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Variasi Diameter Dalam Rotor

Deskripsi	Besaran (mm)	
	Diameter Luar	Diameter Dalam
HS rotor 1	15,5	6
HS rotor 2	15,5	8
HS rotor 3	15,5	10
LS rotor 1	28	16
LS rotor 2	28	18
LS rotor 3	28	20

3.3.4 Tahap *Processing* dengan Menggunakan Ansys 17.2

Tahap *processing* ini merupakan tahap yang menggunakan metode analisis magnetostatik dan analisis *transient* pada *software Ansys Maxwell Electromagnetic*. Tahap magnetostatik meliputi pengaturan *meshing* pada *software* dan tahap *transient* merupakan proses perhitungan *finite element* yang dilakukan *software*. Desain pada tahap sebelumnya dilanjutkan dengan mengatur nilai *mesh* pada metode analisis magnetostatik dimana panjang mesh tersebut harus konvergen. Lalu dilakukan beberapa pengaturan lainnya pada metode analisis *transient* sebelum dilakukan simulasi analisis 3D *finite element*. Hasil yang ingin didapatkan yaitu kerapatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan tiap pasangan *magnetic gear*. Tiap desain dari HS dan LS rotor akan dipasangkan dengan variasi *air gap* yang berbeda pula. Pasangan rotor pembentuk *magnetic gear* dapat dilihat pada table 3.3

Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *magnetostatik* adalah sebagai berikut:

1. *Insert Maxwell 3D Design*

Membuka *software* Ansys Maxwell Electromagnetic dan memilih lembar kerja Maxwell 3D Design. Penelitian ini menggunakan Ansys versi 17.2

2. *Input Modeler dan Setting Modeler*

Input model 3D batang magnet dan dilakukan *assembly* sehingga menjadi rotor HS dan rotor LS. Pemasangan rotor HS dan rotor LS diatur sesuai dengan table 3.3. Lalu lakukan pengaturan peletakan sesuai dengan besaran *air gap* yang ditentukan yaitu 1mm, 2mm, dan 3mm untuk kemudian dianalisis besaran torsi dan B yang dihasilkan.

Tabel 3.3 Variasi Pasangan Rotor HS dan Rotor LS

Pasang Gear		Magnetic gear
LS 1	HS 1	MG A
	HS 2	MG B
	HS 3	MG C
LS 2	HS 1	MG D
	HS 2	MG E
	HS 3	MG F
LS 3	HS 1	MG G
	HS 2	MG H
	HS 3	MG I

3. *Assign Material*

Menentukan bahan magnet dan arah gaya magnet dari tiap batang magnet penyusun rotor. Arah gaya magnet diatur berdasarkan sumbu yang telah ditentukan. Bahan magnet yang digunakan yaitu NdFeB35 dengan karakteristik bahan seperti pada gambar 3.1.

View / Edit Material

Material Name: NdFeb35

Material Coordinate System Type: Cylindrical

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.05	
Bulk Conductivity	Simple	667000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
• Magnitude	Vector Mag	867	kA_per_meter
• R Component	Unit Vector	1	
• Phi Component	Unit Vector	0	
• Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model		None	w/m^3
Mass Density	Simple	7400	kg/m^3
Composition		Solid	

View/Edit Material for:

☒ Active Design

☐ This Product

☐ All Products

View/Edit Modifier for:

☐ Thermal Modifier

Validate Material

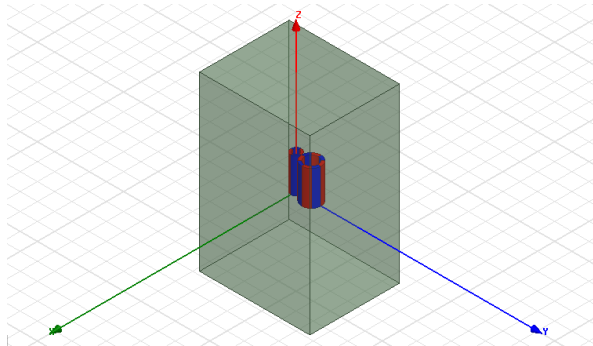
Calculate Properties for:

Reset OK Cancel

Gambar 3.1 Karakteristik Bahan Magnet yang digunakan

4. Region

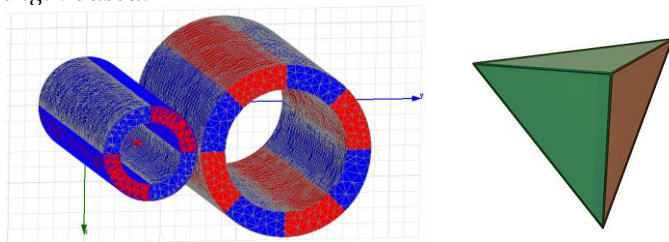
Region merupakan daerah ruang operasi disekitar *magnetic gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. *Region* tersebut dibuat dengan cara membuat model 3D bervolume udara diluar komponen *magnetic gear* seperti pada gambar 3.1



Gambar 3.2 Pembuatan *Region Magnetic gear*

5. *Assign Mesh Operation*

Melakukan pengaturan *mesh* pada setiap komponen 3D magnet. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedra seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection, length based*.



Gambar 3.3 Bentuk *Meshing*

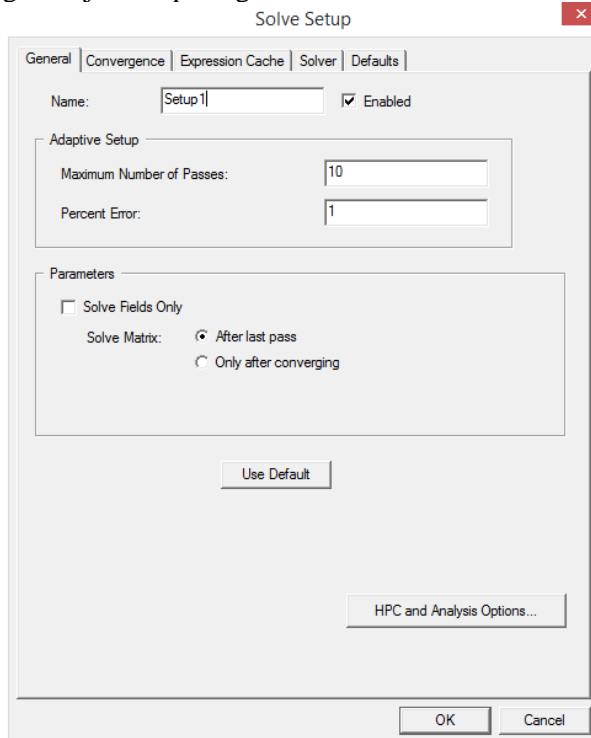
6. *Assign Boundary or Excitations*

Lakukan pengaturan *Eddy Current Boundaries* pada *excitation*. *Excitation* yang diatur yaitu pada bagian *set eddy effect* ke mode *default* dimana seluruh komponen magnet dianggap tidak mengalami *eddy effect*. Hal ini berarti komponen magnet tersebut merupakan magnet

permanen yang memiliki medan magnet (H) yang secara kontinyu melewati batas *boundary*.

7. *Setup Analisis Mesh*

Merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Dengan menggunakan metode *adaptive passes* pada *software* dan menentukan persentase *error* yang diijinkan. Pada penelitian ini, *adaptive passes* yang digunakan yaitu 10 dengan persentase *error* 1% seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.4 *Setup Analisis Mesh*

8. Iterate

Setelah menetapkan panjang *mesh*, nilai *adaptive passes* dan persentase *error*, langkah selanjutnya adalah *iterate*. Proses ini merupakan proses perhitungan yang dilakukan *software* untuk mengetahui apakah panjang *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. *Iterate* akan dikatakan konvergen apabila *adaptive passes* telah sukses dengan nilai persentase *error* $\leq 1\%$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4.

Apabila tidak tercapai kriteria konvergen maka dilakukan perbaikan pada tahap *assign mesh operation*. Namun apabila telah dicapai kriteria konvergen, maka simulasi bisa dilanjutkan ke metode *transient*.

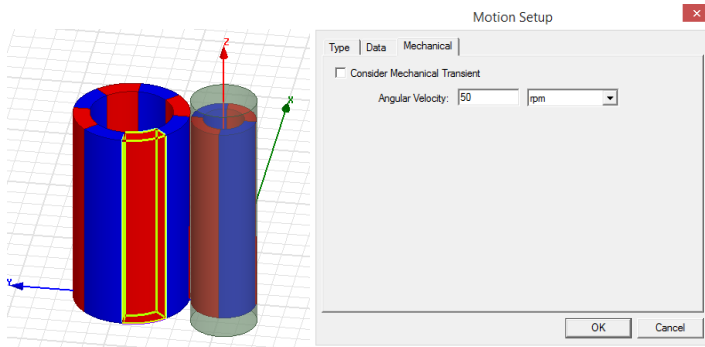
Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	91995	33.11	23.089	N/A
2	119684	33.36	7.0426	0.75744
3	155778	33.799	3.7586	1.3135
4	202686	34.028	2.176	0.67793
5	263613	34.1	1.3442	0.21384
6	342915	34.11	0.8911	0.027127
7	445893	34.102	0.62689	0.023512
8	579846	34.093	0.46541	0.02543
9	753982	34.093	0.35036	0.0001781
10	980315	34.1	0.26761	0.019208

Gambar 3.5 Hasil Analisis *Mesh*

Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *transient* adalah sebagai berikut:

1. Setting Motion

Selanjutnya menentukan part yang dianggap sebagai *driving part* dengan cara memberikan *motion* pada part tersebut seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. *Driving part* yang ditentukan adalah HS rotor yang diberi input putaran sebesar 50 rpm.



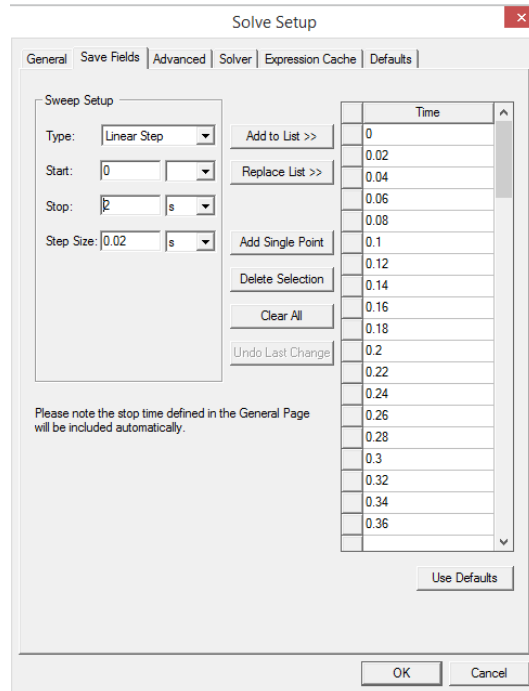
Gambar 3.6 Pembuatan *Part Motion* pada *Magnetic gear*

2. Assign Parameter

Menentukan parameter yang akan dihasilkan oleh proses analisis. Parameter ini merupakan hasil yang kita inginkan dan akan ditampilkan oleh *software*. Parameter tersebut yaitu torsi pada HS rotor dan torsi pada LS rotor.

3. Analysis Setup

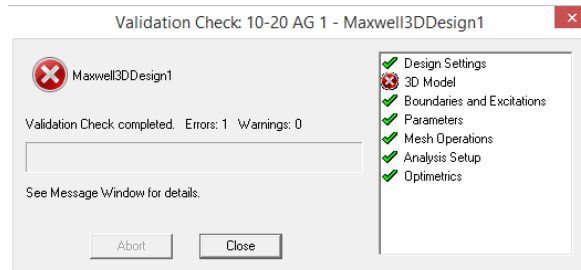
Menentukan set analisis pada *software*. Pada simulasi ini, analisis diatur pada lama waktu putaran selama 2 detik, dengan *time step* 0,02 detik seperti pada gambar 3.6. Artinya, pengaturan ini bertujuan untuk mengetahui besar torsi yang dihasilkan pada HS rotor maupun LS rotor setiap 0,02 detik selama putaran 2 detik dengan kecepatan putar 50 rpm.



Gambar 3.7 Setup Analisis

4. Validation Check

Melakukan *validation check* pada *software* dengan mengklik ikon validate pada *toolbar*. Hal ini dilakukan untuk memastikan tidak ada kesalahan pada langkah 1-9. Jika terdapat tanda error maka terdapat kesalahan yang harus diperbaiki pada saat melakukan proses pengaturan seperti pada gambar 3.7. Jika tidak terdapat tanda error, maka analisis siap dilakukan



Gambar 3.8 *Validation Check*

5. *Analyze Process*

Melakukan proses simulasi dan analisis dengan mengklik ikon *analyze all* pada *toolbar*.

3.3.3 Tahap *Processing* dengan Menggunakan FEMM

Tahap *processing* ini merupakan tahap yang menggunakan metode analisis *2D finite element*. Tahap ini dilakukan untuk menampilkan distribusi rapat medan magnet sehingga dapat lebih jelas diketahui perbedaan antar rapat medan magnet di beberapa titik yang ditampilkan secara dua dimensi. Berbeda dengan *Ansys*, nilai *mesh* pada metode analisis tidak ditentukan sendiri melainkan dianalisis dan ditentukan oleh FEMM. Hasil yang ingin didapatkan yaitu visualisasi dari plotingan distribusi kerapatan medan magnet (*B*). Tiap desain dari HS dan LS rotor akan dipasangkan dengan variasi *air gap* yang berbeda pula. Pasangan rotor pembentuk *magnetic gear* dapat dilihat pada table 3.3

Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *2D finite element* adalah sebagai berikut:

1. *Insert FEMM Magnetic Problem*

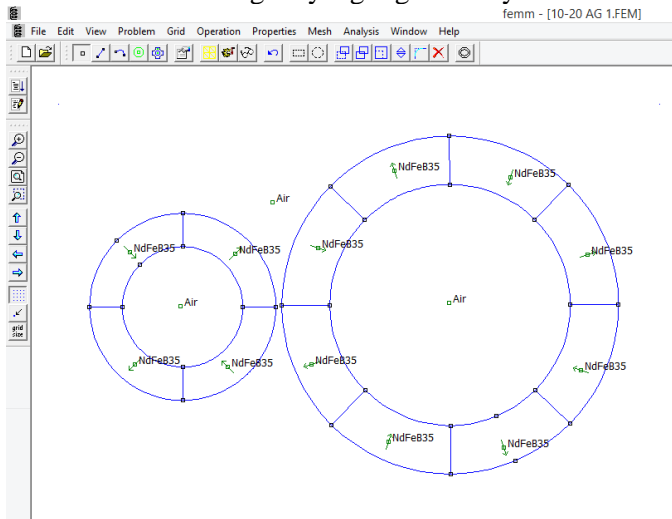
Membuka *software* FEMM dan memilih lembar kerja *Magnetic Problem*. Penelitian ini menggunakan FEMM versi 4.2

2. *Input Modeler dan Setting Modeler*

Input model 2D batang magnet yang telah *diassembly* sehingga menjadi pasangan *magnetic gear* rotor HS dan rotor LS. Pemasangan rotor HS dan rotor LS diatur sesuai dengan table 3.3. Lalu lakukan pengaturan peletakan sesuai dengan besaran *air gap* yang ditentukan yaitu 1mm dan 2mm untuk kemudian dianalisis besaran B yang dihasilkan.

3. *Assign Material*

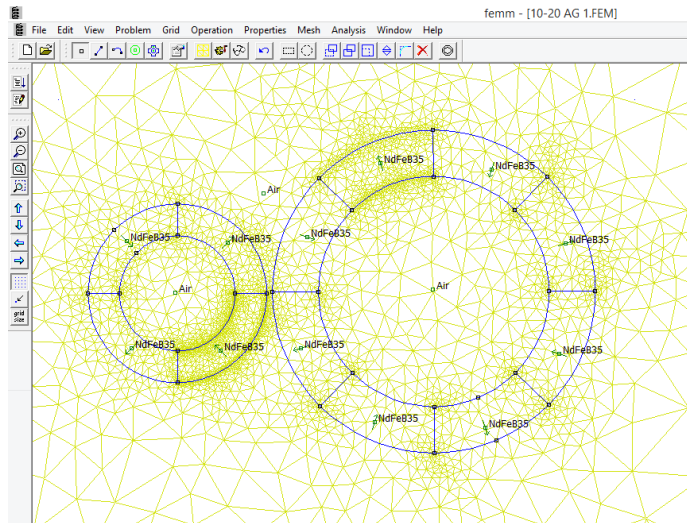
Menentukan bahan magnet dan arah gaya magnet dari tiap batang magnet penyusun rotor seperti pada gambar 3.8. Arah gaya magnet diatur berdasarkan sumbu yang telah ditentukan. Bahan magnet yang digunakan yaitu NdFe35.



Gambar 3.9 *Assign Material* pada FEMM

4. *Assign Mesh*

Melakukan *meshing* pada setiap komponen 2D magnet. Bentuk *meshing* yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe segitiga seperti pada gambar 3.9.



Gambar 3.10 Assign Mesh pada FEMM

5. Analyze Process

Melakukan proses simulasi dan analisis dengan mengklik ikon *analyze all* pada *toolbar*.

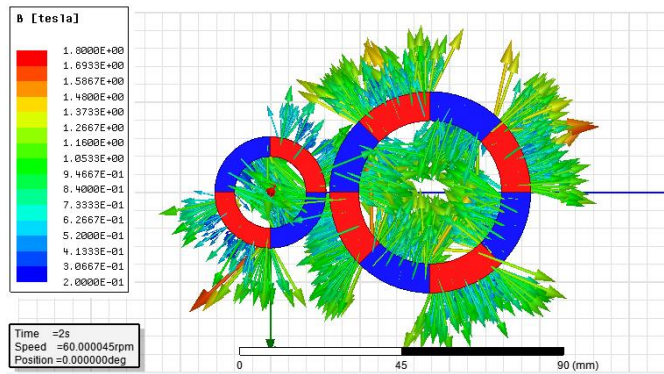
3.3.5 Tahap *Post-Processing*

Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi. Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, kita akan mendapatkan data mengenai kearpatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan *magnetic gear*. Untuk mendapatkan data-data tersebut maka dilakukan langkah sebagai berikut:

1. *Flux density*/Kerapatan Medan Magnet (B) pada *Ansys*

Flux density merupakan besaran vektor yang memiliki nilai dan arah. Untuk mendapatkan besaran nilai dan arah B maka dilakukan plot terhadap vektor B dengan melakukan *setup* pada ikon *Field Overlays* pada bar *Project Manager*. Lalu *software* akan menampilkan arah vektor B pada model 3D dengan warna yang berbeda yang

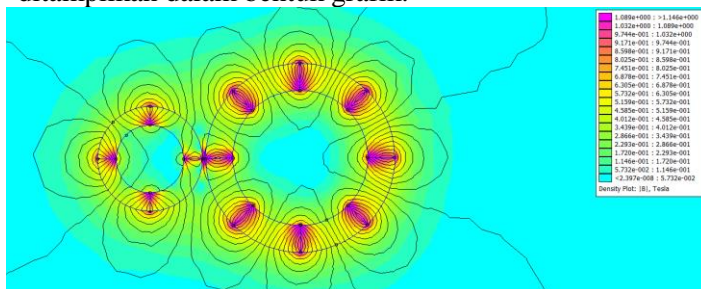
menunjukkan besaran nilai vector seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.11 Nilai dan Arah Vektor *Flux density*

2. *Flux density*/Kerapatan Medan Magnet (B) pada FEMM

Tampilan *flux density* pada *output* yang dihasilkan FEMM tidak berupa vektor namun hanya plot warna yang membedakan besaran B pada tiap titik *magnetic gear*. Hasil berupa gradien warna akan langsung ditampilkan setelah proses analisis selesai seperti pada gambar 3.11. Lalu untuk mengetahui besar B di titik tertentu maka kita bisa mengatur untuk menampilkan besaran B dari suatu titik, garis atau area tertentu pada *magnetic gear* yang akan ditampilkan dalam bentuk grafik.

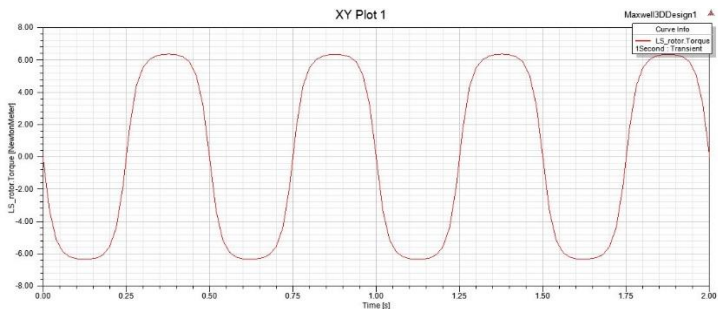


Gambar 3.12 Besaran Nilai *Flux density* (B)

3. *Torque/Torsi Magnetic gear (T)*

Sesuai dengan *setup* yang dilakukan pada tahap *processing*, torsi yang dihasilkan oleh simulasi ini adalah besaran torsi pada tiap selang waktu 0,01 detik pada kecepatan putaran 360 deg/s. Besaran torsi terhadap waktu pembebanan tersebut dapat ditampilkan baik dalam bentuk tabel maupun grafik. dari data tersebut, kita dapat melihat torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh rotor HS maupun rotor LS.

Untuk mendapatkan data torsi terhadap waktu putaran, maka dilakukan *setup* pada ikon *Result* pada bar *Project Manager*. Lalu *software* akan menghasilkan data torsi pada rotor HS maupun rotor LS dalam bentuk table maupun grafik, bentuk grafik tersebut seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3.13 Grafik Torsi terhadap Waktu Putaran
Magnetic gear

3.4 Analisis Data dan Verifikasi Data

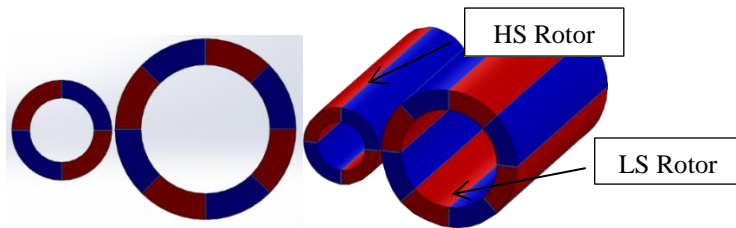
3.4.1 Parameter Penelitian

Tabel 3.4 Parameter Input dan Parameter Output Penelitian

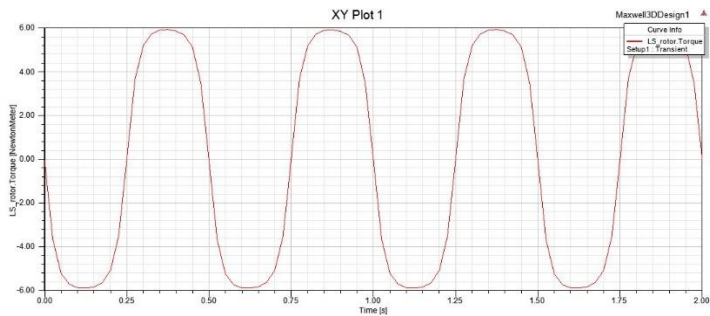
Parameter Input		Parameter Output
Konstan	Variasi	
<ul style="list-style-type: none"> • Bahan magnet yang digunakan yaitu NdFeB • Rasio <i>gear</i> yang digunakan yaitu 1:2 • Kecepatan putaran yang digunakan yaitu 60 rpm • Geometri rotor HS yaitu: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Diameter luar 15,5mm ◦ Lebar magnet 100mm • Geometri rotor LS yaitu: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Diameter luar 28mm ◦ Lebar magnet 100mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Diameter dalm rotor HS : <ul style="list-style-type: none"> ◦ 6 mm ◦ 8 mm ◦ 10 mm • Diameter dalam rotor LS: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 16 mm ◦ 18 mm ◦ 20 mm • Jarak <i>air gap</i> : <ul style="list-style-type: none"> ◦ 1 mm ◦ 2 mm ◦ 3 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Torsi (T) • Kerapatan medan magnet (B)

3.4.2 Proses Verifikasi Data

Proses verifikasi merupakan proses membandingkan data pada hasil simulasi penelitian sebelumnya dengan data hasil simulasi pada penelitian yang dilakukan sekarang. Penelitian yang digunakan sebagai pembanding adalah penelitian yang dilakukan oleh **G. muruganandam et al. (2012)** menggunakan *software* MagNet, lalu dibandingkan dengan data hasil simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic. Desain yang digunakan sebagai obyek simulasi ditunjukkan pada gambar 3.14. Setelah dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic didapatkan hasil berupa grafik torsi terhadap waktu yang ditunjukkan pada gambar 3.15. hasil yang berupa torsi inilah yang akan dibandingkan dengan melihat torsi dari penelitian sebelumnya dan penelitian yang dilakukan sekarang.



Gambar 3.14 Desain Obyek Simulasi



Gambar 3.15 Grafik Torsi terhadap Waktu Menggunakan *Ansys Maxwell Electromagnetic*

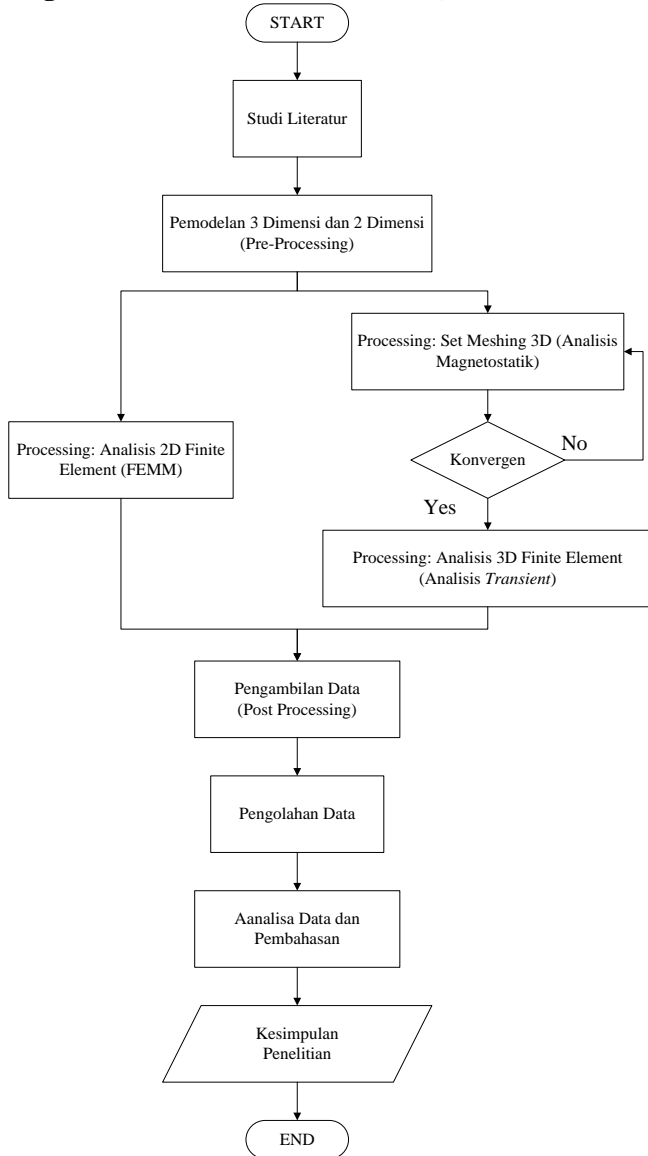
Dari hasil yang didapat tersebut kemudian dilakukan proses verifikasi dengan membandingkan data hasil dari muruganandam et al. (2012) menggunakan *software* MagNet, yang ditunjukkan pada tabel 4.1 dibawah.

Tabel 3.5 Proses Verifikasi

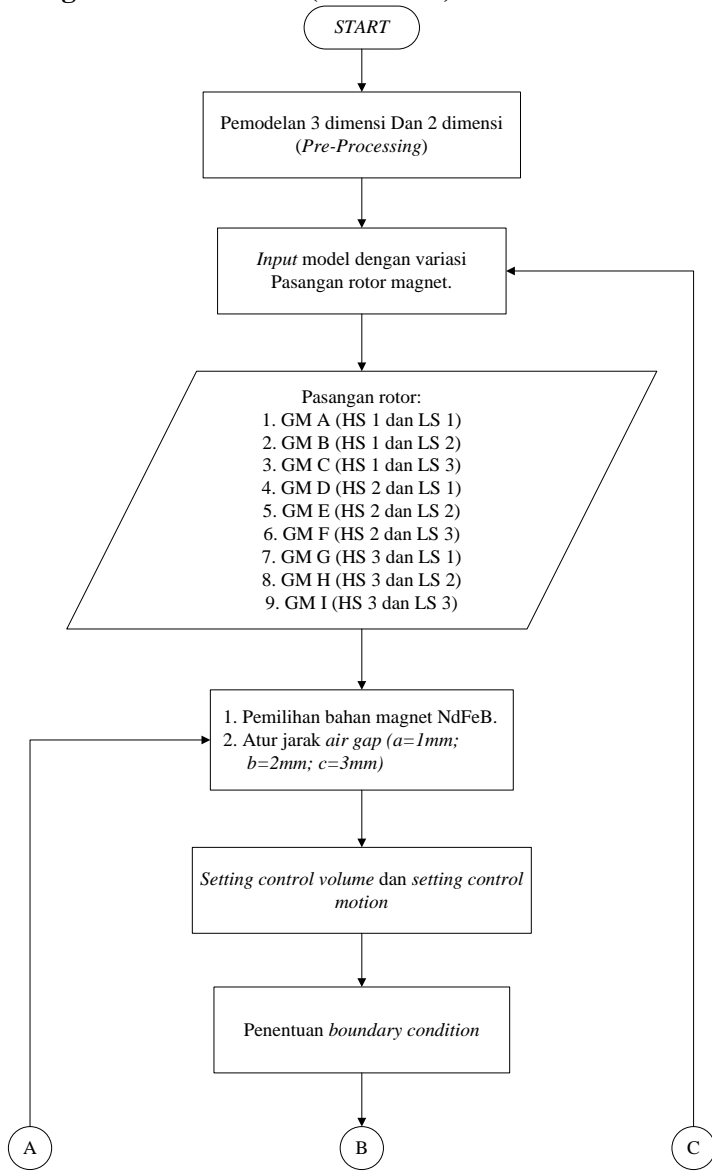
Material magnet	Air gap	Software MagNet	Software Ansys maxwell	Verifikasi	
		T_{max}	T_{max}	Sesuai	Tidak sesuai
NdFeB	1	6	5,926	√	-
NdFeB	2	4,8	4,798	√	-
NdFeB	3	3,9	4,012	√	-

Dari tabel tersebut diketahui bahwa nilai T_{\max} yang didapat menggunakan *software* ansys maxwell memiliki nilai yang hampir sama dengan yang didapatkan *software* magnet. Sehingga dapat disimpulkan bahwa verifikasi *software* yang sudah dilakukan sesuai atau valid, yang artinya langkah-langkah yang dilakukan menggunakan *software* yang berbeda dengan sebelumnya sudah benar dengan didapatkannya nilai yang sama. Sehingga penelitian dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi menggunakan desain yang telah ditentukan.

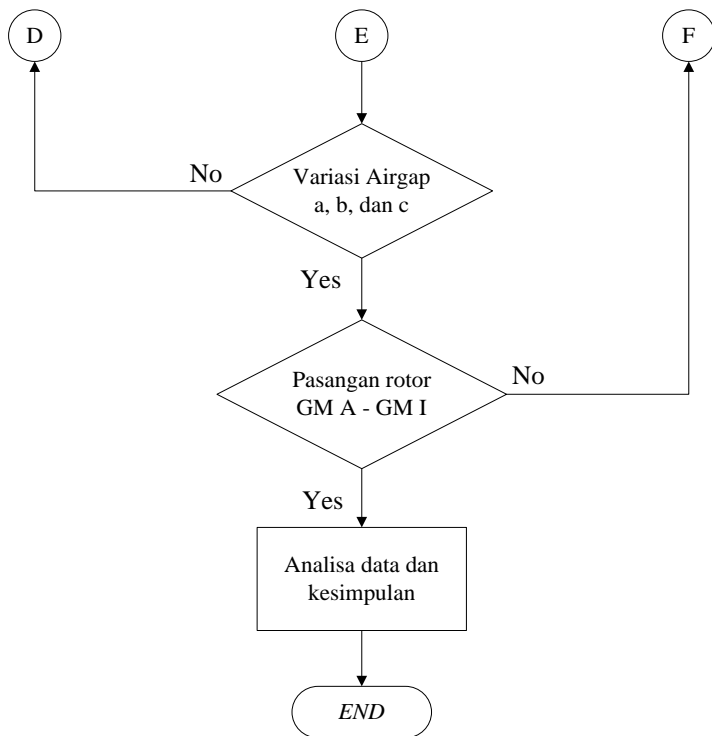
3.5 Diagram Alir Penelitian (*Flowchart*)



3.6 Diagram Alir Simulasi (*Flowchart*)







BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Ansys Maxwell Electromagnetic*, lalu didapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu. Dari grafik tersebut, dapat diketahui torsi maksimum yang mampu ditanggung *magnetic gear*. Simulasi dilakukan pada 9 pasang *magnetic gear* dengan 3 variasi *air gap* yaitu *air gap* 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. 9 pasang *gear megnatic* ini terdiri dari 3 HS rotor dan 3 LS rotor dengan variasi ketebalan batang magnet yang berbeda. Ke-3 rotor HS dan rotor LS lalu dipasangkan sehingga didapatkan 9 pasang *magnetic gear*.

Simulasi yang dihasilkan oleh *software Ansys Maxwell Electromagnetic* menghasilkan informasi berupa data *torsi* dan *flux density* yang terjadi pada *magnetic gear*. Torsi merupakan data utama yang dianalisis sedangkan *flux density* sebagai informasi tambahan terhadap analisis *torsi*. Untuk mendapatkan *flux density* yang lebih akurat maka dilakukan simulasi 2 dimensi dengan menggunakan *software FEMM*, hasil *flux density* dari kedua *software* selanjutnya akan dibandingkan. Hasil dari simulasi berupa grafik torsi, plot *flux density* 3D, dan plot *flux density* 2D. Adapaun tabel data hasil simulasi dapat dilihat pada lampiran.

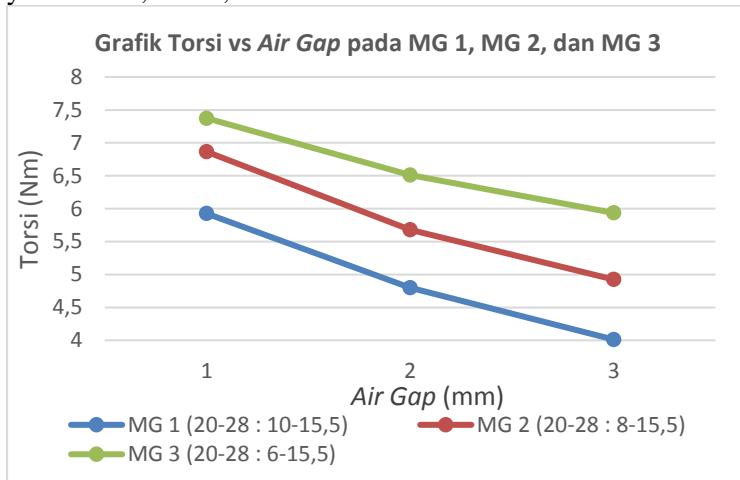
4.2 Analisis dan Pembahasan Pasangan *Magnetic gear*

Analisis dilakukan pada 3 jenis LS rotor atau *magnet driven* yang dipasangkan ke 3 HS rotor (*magnet source*) dan divariasikan sebanyak 3 variasi *air gap* pada setiap pasang *magnetic gear*. Sehingga total dari pasang gear yaitu 9 pasang *magnetic gear*.

4.2.1 Perbandingan Torsi Pada Magnet Driven 1 (D_{in} :20mm, D_{out} :28mm)

Pada simulasi ini, magnet driven 1 (rotor LS 1) dengan diameter dalam 20 mm dan diameter luar 28 mm dipasangkan dengan tiga jenis rotor HS. 3 rotor HS ini memiliki diameter luar 15,5 mm dan diameter dalam 10 mm, 8 mm, dan 6 mm.

Tiap pasang *magnetic gear* (GM) akan divariasikan ke 3 *air gap* yaitu 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.



Gambar 4.1 Grafik Torsi vs *Air Gap* pada MG 1, MG 2, dan MG 3

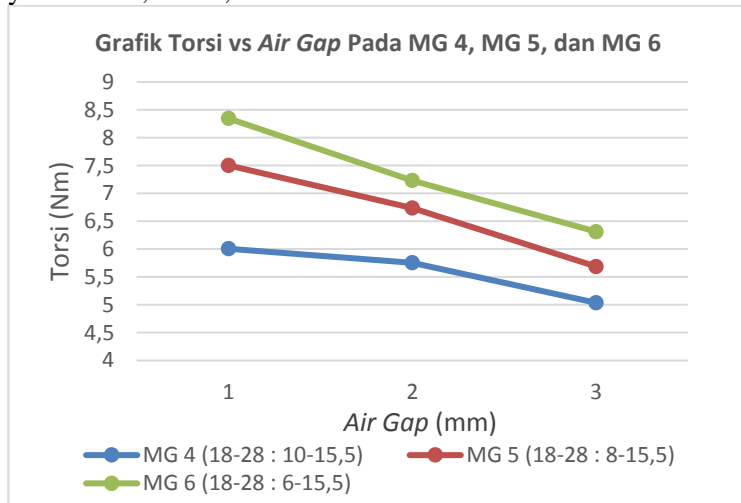
Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa MG 1 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum terendah yaitu 5,92 Nm, 4,79 Nm, dan 4,01 Nm. Selanjutnya MG 2 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum yaitu 6,86 Nm, 5,67 Nm, dan 4,92 Nm. Lalu MG 3 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum tertinggi yaitu 7,37 Nm, 6,51 Nm dan 5,93 Nm.

Secara berurutan pasangan MG yang memiliki torsi yang terendah ke yang tertinggi yaitu MG 1, MG 2 dan MG 3. Hal ini disebabkan oleh magnet rotor HS yang dipasangkan pada MG 3 memiliki ketebalan yang paling besar sedangkan rotor HS yang dipasangkan pada MG 1 memiliki ketebalan yang paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.12) yaitu ketebalan gear berbanding lurus dengan torsi, dimana semakin tebal magnet penyusun rotor maka semakin besar pula torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

Terlihat pula bahwa torsi yang paling besar didapatkan pada *air gap* 1 mm dibandingkan dengan *air gap* 2 mm dan 3 mm yang memiliki torsi lebih kecil. Hal ini sudah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.11) yaitu besar *air gap* berbanding terbalik dengan torsi, dimana semakin besar jarak *air gap* pada *magnetic gear* maka semakin kecil torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

4.2.2 Perbandingan Torsi Pada Magnet Driven 2 (D_{in} :18mm, D_{out} :28mm)

Pada simulasi ini, magnet driven 2 (rotor LS 2) dengan diameter dalam 18 mm dan diameter luar 28 mm dipasangkan dengan tiga jenis rotor HS. 3 rotor HS ini memiliki diameter luar 15,5 mm dan diameter dalam 10 mm, 8 mm, dan 6 mm. Tiap pasang *magnetic gear* (GM) akan divariasikan ke 3 *air gap* yaitu 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Torsi vs Air Gap pada MG 4, MG 5, dan MG 6

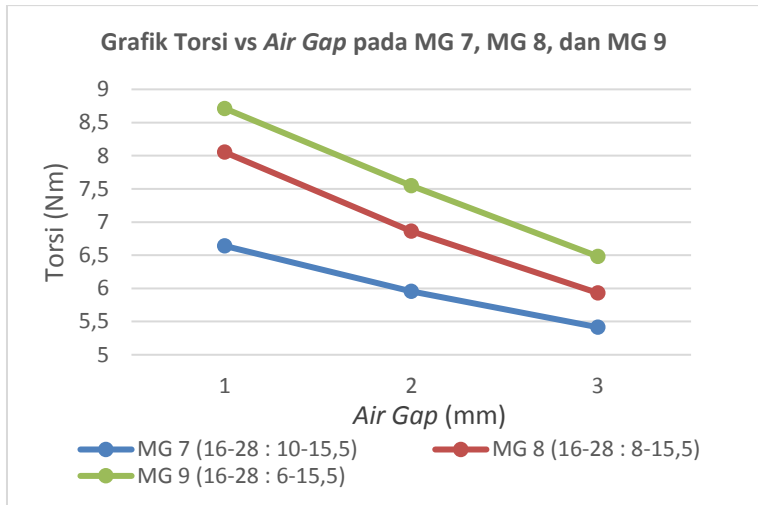
Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa MG 4 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum terendah yaitu 6 Nm, 5,75 Nm, dan 5 Nm. Selanjutnya MG 5 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum yaitu 7,5 Nm, 6,74 Nm, dan 5,68 Nm. Lalu MG 6 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum tertinggi yaitu 8,34 Nm, 7,23 Nm dan 6,31 Nm.

Secara berurutan pasangan MG yang memiliki torsi yang terendah ke yang tertinggi yaitu MG 4, MG 5 dan MG 6. Hal ini disebabkan oleh magnet rotor HS yang dipasangkan pada MG 6 memiliki ketebalan yang paling besar sedangkan rotor HS yang dipasangkan pada MG 4 memiliki ketebalan yang paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.12) yaitu ketebalan gear berbanding lurus dengan torsi, dimana semakin tebal magnet penyusun rotor maka semakin besar pula torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

Terlihat pula bahwa torsi yang paling besar didapatkan pada *air gap* 1 mm dibandingkan dengan *air gap* 2 mm dan 3 mm yang memiliki torsi lebih kecil. Hal ini sudah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.11) yaitu besar *air gap* berbanding terbalik dengan torsi, dimana semakin besar jarak *air gap* pada *magnetic gear* maka semakin kecil torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

4.2.3 Perbandingan Torsi Pada Magnet Driven 3 (D_{in} :16mm, D_{out} :28mm)

Pada simulasi ini, magnet driven 3 (rotor LS 3) dengan diameter dalam 16 mm dan diameter luar 28 mm dipasangkan dengan tiga jenis rotor HS. 3 rotor HS ini memiliki diameter luar 15,5 mm dan diamter dalam 10 mm, 8 mm, dan 6 mm. Tiap pasang *magnetic gear* (GM) akan divariasikan ke 3 *air gap* yaitu 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Torsi vs Air Gap pada MG 7, MG 8, dan MG 9

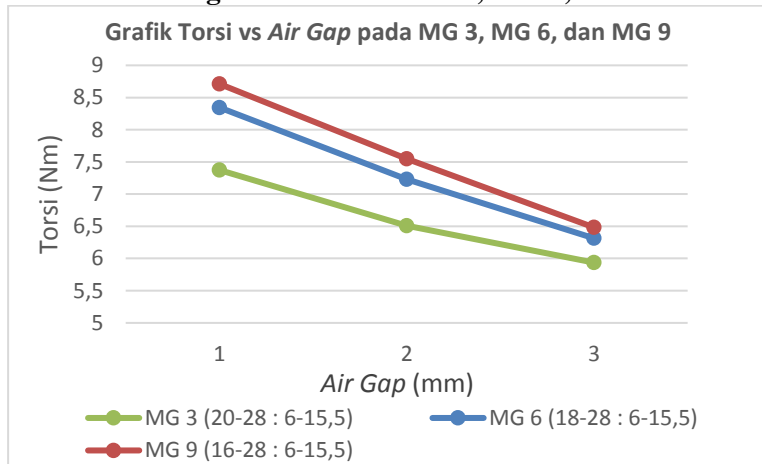
Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa MG 7 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum terendah yaitu 6,6 Nm, 5,95 Nm, dan 5,4 Nm. Selanjutnya MG 8 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum yaitu 8,05 Nm, 6,86 Nm, dan 5,93 Nm. Lalu MG 9 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum tertinggi yaitu 8,71 Nm, 7,54 Nm dan 6,48 Nm.

Secara berurutan pasangan MG yang memiliki torsi yang terendah ke yang tertinggi yaitu MG 7, MG 8 dan MG 9. Hal ini disebabkan oleh magnet rotor HS yang dipasangkan pada MG 6 memiliki ketebalan yang paling besar sedangkan rotor HS yang dipasangkan pada MG 4 memiliki ketebalan yang paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.12) yaitu ketebalan gear berbanding lurus dengan torsi, dimana semakin tebal magnet penyusun rotor maka semakin besar pula torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

Terlihat pula bahwa torsi yang paling besar didapatkan pada *air gap* 1 mm dibandingkan dengan *air gap* 2 mm dan 3 mm yang memiliki torsi lebih kecil. Hal ini sudah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.11) yaitu besar *air gap* berbanding terbalik dengan torsi, dimana semakin besar jarak *air gap* pada *magnetic gear* maka semakin kecil torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

Berdasarkan ke 3 grafik diatas didapatkan bahwa pasangan MG dengan torsi tertinggi pada magnet driven 1 yaitu MG 3, sedangkan pasangan MG dengan torsi tertinggi pada magnet driven 2 yaitu MG 6, dan pasangan MG dengan torsi tertinggi pada magnet driven 3 yaitu MG 9. Sehingga untuk membandingkan pasangan MG terbaik dari setiap magnet driven dapat dilihat grafik pada gambar 4.20

4.2.4 Perbandingan Torsi Pada MG 3, MG 6, dan MG 9



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Torsi pada MG 3, MG 6, dan MG 9

Pada tiap pasang MG didapatkan bahwa MG dengan torsi maksimum terbesar pada magnet *driven* 1 yaitu pada MG 3

yang dipasangkan dengan HS rotor 3 (D_{in} : 6mm, D_{out} :15,5mm). Sedangkan pada magnet *driven* 2 yaitu MG 6 dengan HS rotor 3 (D_{in} : 6mm, D_{out} :15,5mm). Dan pada magnet *driven* 3 yaitu MG 9 dengan HS rotor 3 (D_{in} : 6mm, D_{out} :15,5mm).

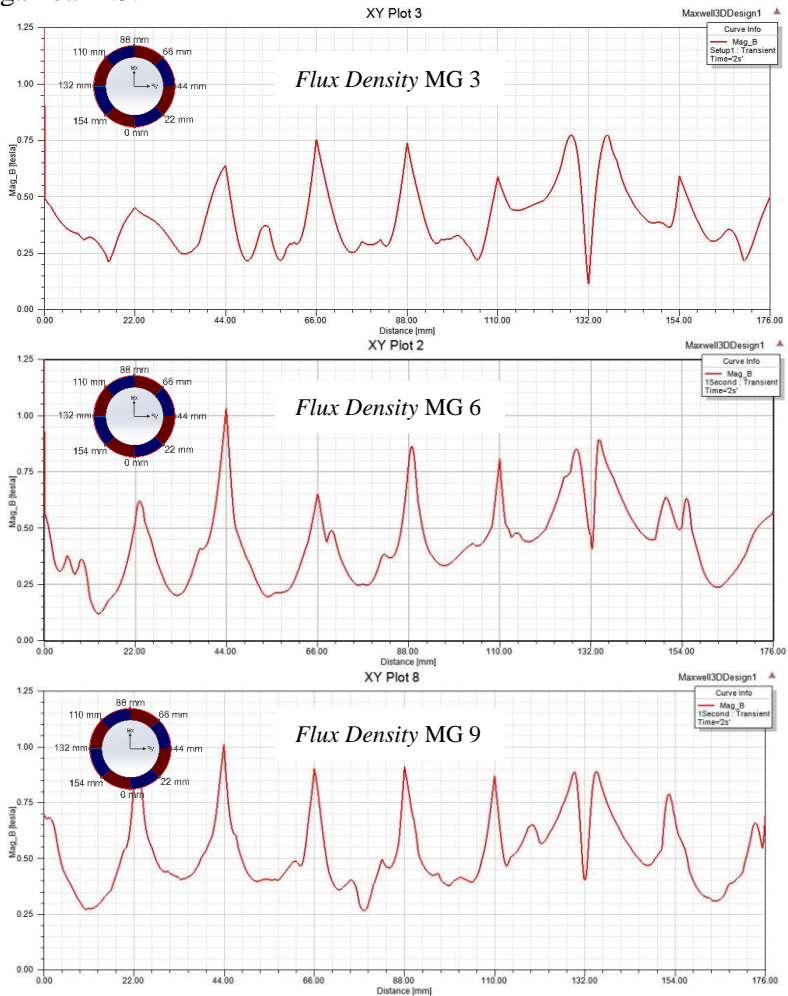
Pada gambar 4.20 dapat dilihat bahwa MG 3 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum terendah yaitu 7,37 Nm, 6,51 Nm, dan 5,93 Nm. Selanjutnya MG 6 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum yaitu 8,34 Nm, 7,23 Nm, dan 6,31 Nm. Lalu MG 9 dengan *air gap* 1mm, 2mm dan 3mm memiliki torsi maksimum tertinggi yaitu 8,71 Nm, 7,54 Nm dan 6,48 Nm.

Secara berurutan pasangan MG yang memiliki torsi yang terendah ke yang tertinggi yaitu MG 3, MG 6 dan MG 9. Hal ini disebabkan oleh magnet rotor HS yang dipasangkan pada MG 9 memiliki ketebalan yang paling besar sedangkan rotor HS yang dipasangkan pada MG 3 memiliki ketebalan yang paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.12) yaitu ketebalan gear berbanding lurus dengan torsi, dimana semakin tebal magnet penyusun rotor maka semakin besar pula torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

Terlihat pula bahwa torsi yang paling besar didapatkan pada *air gap* 1 mm dibandingkan dengan *air gap* 2 mm dan 3 mm yang memiliki torsi lebih kecil. Hal ini sudah sesuai dengan rumus torsi (persamaan 2.11) yaitu besar *air gap* berbanding terbalik dengan torsi, dimana semakin besar jarak *air gap* pada *magnetic gear* maka semakin kecil torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

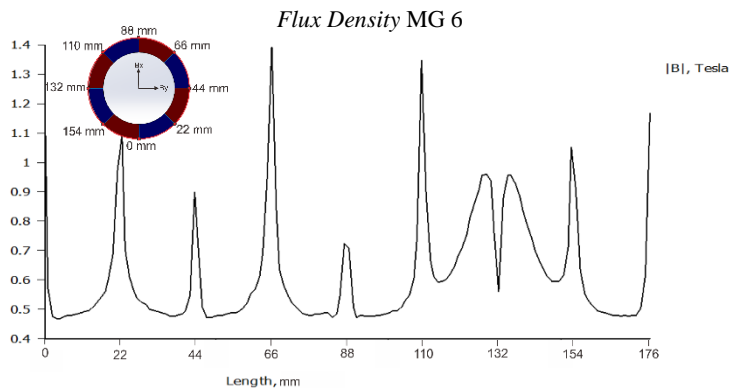
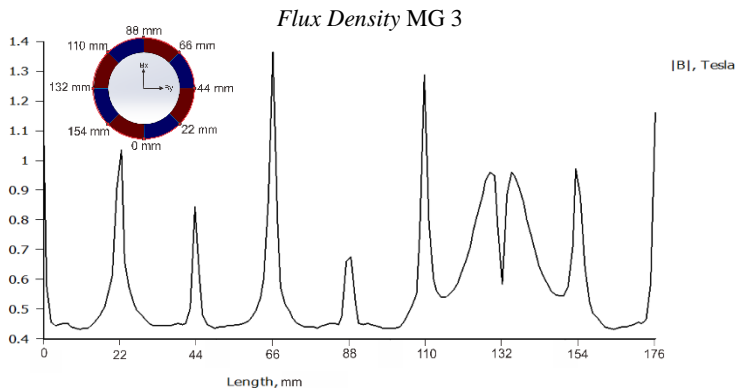
Kenaikan nilai torsi pada *magnetic gear* diakibatkan oleh naiknya nilai *flux density* yang dipengaruhi oleh ketebalan rotor *magnetic gear*. *Flux density* yang timbul pada *magnetic gear* merupakan besaran resultan dari vektor ke arah koordinat x, y, dan z (B_x , B_y , B_z). Nilai B_x , B_y , dan B_z dapat dilihat pada lampiran. Besaran resultan dari ketiga vektor tersebut selanjutnya disebut *flux density* (B). Pengaruh ketebalan rotor terhadap *flux density*

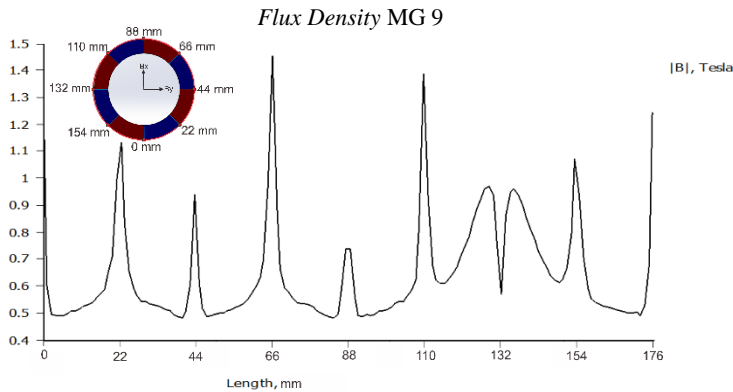
pada MG 3, MG 6, dan MG 9 secara 3 dimensi dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan *Flux Density* pada MG 3, MG 6, dan MG 9 melalui Simulasi 3 Dimensi

Grafik di atas menunjukkan bahwa *flux density* dengan nilai yang paling besar terdapat pada MG 9 yang merupakan *magnetic gear* dengan ketebalan rotor paling besar. Grafik *flux density* pada software Ansys, hanya memperlihatkan besaran *flux density* pada satu garis melingkar saja di sisi luar rotor LS. Sehingga analisis *flux density* pada *magnetic gear* lebih baik dilakukan dengan simulasi 2 dimensi menggunakan software FEMM. Simulasi 2 dimensi pada software tersebut mampu menunjukkan nilai integrasi *flux density* pada seluruh sisi luar rotor. Adapun nilai integrasi *flux density* di keseluruhan sisi luar rotor pada MG 3, MG 6, dan MG 9 dapat dilihat pada gambar 4.6.





Gambar 4.6 Grafik Perbandingan *Flux Density* pada MG 3, MG 6, dan MG 9 melalui Simulasi 2 Dimensi

Berdasarkan grafik *flux density* pada gambar 4.6, dapat diketahui bahwa dengan memperbesar ketebalan rotor *magnetic gear* maka akan memperbesar nilai *flux density* gear tersebut. Nilai *flux density* yang semakin besar mengakibatkan munculnya gaya magnet (F) dengan nilai yang besar pula. Gaya magnet (F) yang semakin besar akan membuat nilai torsi *magnetic gear* yang semakin besar.

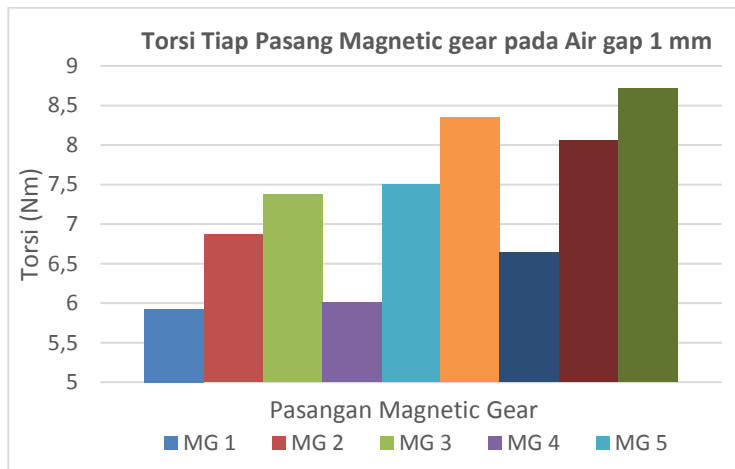
4.3 Analisis dan Pembahasan *Air Gap*

4.3.1 Perbandingan Torsi Maksimum pada *Air Gap* 1 mm

Berdasarkan pembahasan pada sub bab sebelumnya, didapatkan kesimpulan yang sama pada setiap grafik yaitu *air gap* yang menghasilkan torsi maksimum terbesar adalah *air gap* dengan besar 1 mm. Untuk mempermudah pembacaan data, maka data torsi dengan *air gap* 1 mm ditampilkan pada tabel 4.1. dan perbandingannya dapat dilihat pada gambar 4.7.

Tabel 4.1 Data Torsi Maksimum pada *Air Gap* 1 mm

Pasang MG	Air gap (mm)	Torsi (Nm)
MG 1	1	5,926
MG 2	1	6,865
MG 3	1	7,374
MG 4	1	6,006
MG 5	1	7,503
MG 6	1	8,346
MG 7	1	6,64
MG 8	1	8,052
MG 9	1	8,712

**Gambar 4.7** Grafik Perbandingan Torsi Maksimum *Magnetic Gear* pada *Air Gap* 1 mm

Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pasangan *magnetic gear* dengan torsi maksimum terendah adalah MG 1

dengan besar 8,82 Nm yang merupakan bentuk dasar dari penelitian sebelumnya. Sedangkan pasangan gear magnet dengan torsi maksimum tertinggi adalah MG 9 dengan besar 8,71 Nm.

Adanya perbedaan yang jauh dikarenakan adanya perubahan ketebalan pada rotor HS maupun rotor LS. Pada MG 1, D_{in} dan D_{out} rotor LS adalah 20 mm dan 28 mm, D_{in} dan D_{out} rotor HS adalah 10 mm dan 15,5 mm. Sedangkan pada MG 9, D_{in} dan D_{out} rotor LS adalah 20 mm dan 28 mm, D_{in} dan D_{out} rotor HS adalah 10 mm dan 15,5 mm. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi yaitu ketebalan gear berbanding lurus dengan torsi, dimana semakin tebal magnet penyusun rotor maka semakin besar pula torsi yang mampu dikerjakan gear magnet.

4.3.2 Perbandingan Torsi *Magnetic gear* dan *Mechanical gear*

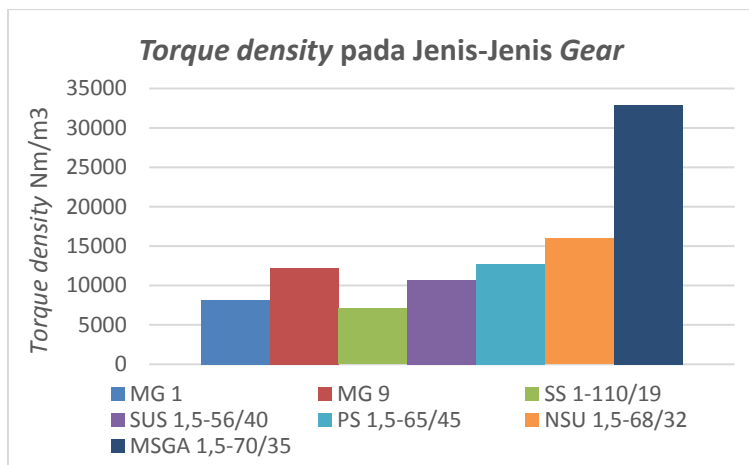
Berdasarkan pembahasan pada sub bab sebelumnya, bentuk *magnetic gear* yang dijadikan acuan adalah MG 1 yang merupakan bentuk dari penelitian sebelumnya. Lalu untuk meningkatkan torsi maksimum *magnetic gear* tersebut maka ketebalan magnet diperbesar baik pada HS rotor maupun LS rotor. Terdapat 9 pasang MG, namun torsi maksimum terbesar terdapat pada MG 9 yang memiliki ketebalan LS rotor dan HS rotor yang paling besar.

Selanjutnya dilakukan perbandingan antara *mechanical gear* dan *magnetic gear*. Perbandingan dilakukan dengan cara membandingkan *torque density* antara kedua jenis gear dengan volume yang sama. Data jenis-jenis gear beserta propertinya dapat dilihat pada tabel 4.2. Untuk memudahkan perbandingan *torque density*, maka dibuatlah grafik yang dapat dilihat pada gambar 4.8.

Tabel 4.2 Data Properti *Magnetic Gear* dan *Mechanical Gear*

Gear	Material	Volume (m³)	Torque (Nm)	Torque density (Nm/m³)
MG 1	NdFeB35	0,00071148	5,826	8188,56
MG 9	NdFeB35	0,00071148	8,712	12244,90
SS 1-110/19	<i>Steel</i>	0,00069784	4,95	7093,32
SUS 1,5-56/40	<i>Stainless Steel</i>	0,00071392	7,63	10687,47
PS 1,5-65/45	<i>Plastic</i>	0,00070001	8,91	12728,25
NSU 1,5-68/32	<i>Plastic with Steel Core</i>	0,00070633	11,3	15998,19
MSGA 1,5-70/35	<i>Chromoly Steel</i>	0,00071655	23,6	32935,36

Properti yang lebih lengkap pada *mechanical gear* dapat dilihat pada lampiran.

**Gambar 4.8** Grafik Perbandingan *Torque Density* pada *Magnetic Gear* dan *Mechanical Gear*

Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa gear dengan *torque density* terkecil yaitu SS 1-110/19 yang merupakan *mechanical gear*. Sedangkan gear dengan *torque density* terbesar yaitu MSGA 1,5-70/35.

MG 1 memiliki *torque density* lebih kecil jika dibandingkan dengan *mechanical gear* pada volume yang sama. Sedangkan MG 9 memiliki *torque density* yang lebih besar dibandingkan dengan *mechanical gear* SS 1-110/19 dan SUS 1,5-56/40, dan memiliki *torque density* yang lebih kecil dibandingkan dengan *mechanical gear* PS 1,5-70/35; NSU 1,5-68/32; dan MSGA 1,5-70/35. Berdasarkan hal tersebut maka dapat disimpulkan bahwa salah satu cara untuk menaikkan besar torsi yang mampu dikerjakan *magnetic gear* adalah dengan menambah ketebalan bahan magnet yang digunakan pada *magnetic gear*. Akan tetapi terdapat beberapa tipe *mechanical gear* dengan bahan gear yang berbeda yang memiliki *torque density* yang jauh lebih tinggi daripada *torque density* pada *magnetic gear*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yang penting pada penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Bertambahnya jarak *air gap* berpengaruh terhadap turunnya nilai torsi maksimum *magnetic gear*. Semakin kecil jarak *air gap* maka nilai torsi maksimum akan semakin besar. Hal ini dikarenakan gaya magnet yang berpengaruh pada rotor LS (magnetisasi) akan semakin besar apabila jarak rotor LS dengan sumber medan magnet (rotor HS) semakin dekat.
2. Bertambahnya ketebalan rotor *magnetic gear* berpengaruh terhadap naiknya nilai torsi maksimum *magnetic gear* tersebut. Semakin besar tebal magnet yang menyusun *magnetic gear* maka torsi maksimum semakin besar pula. Hal ini dikarenakan magnetisasi yang lebih besar terjadi pada luas penampang magnet yang lebih besar. Nilai magnetisasi yang besar akan menghasilkan torsi maksimum yang besar pula.
3. *Magnetic gear* lebih unggul dari beberapa jenis *mechanical gear*. Hal ini dibuktikan dengan nilai *torque density magnetic gear* lebih besar daripada nilai *torque density mechanical gear* berbahan *steel* dan *stainless steel* pada volume gear yang sama. Namun *mechanical gear* dengan bahan *plastic* dan *chromoly steel* memiliki *torque density* yang lebih besar daripada *magnetic gear*.
4. Torsi maksimum *magnetic gear* dapat ditingkatkan dengan cara memperkecil jarak *air gap* hingga jarak tertentu dan memperbesar ketebalan magnet penyusun gear baik pada HS rotor maupun LS rotor.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan berikut adalah beberapa saran yang penulis anjurkan untuk dilakukan, yaitu:

1. Perlu dilakukannya pembuatan *prototype* untuk mengetahui apakah hasil simulasi yang didapatkan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.
2. Gunakan *time step* yang lebih kecil pada proses analisis *transient* agar grafik torsi yang didapatkan membentuk pola gelombang yang teliti

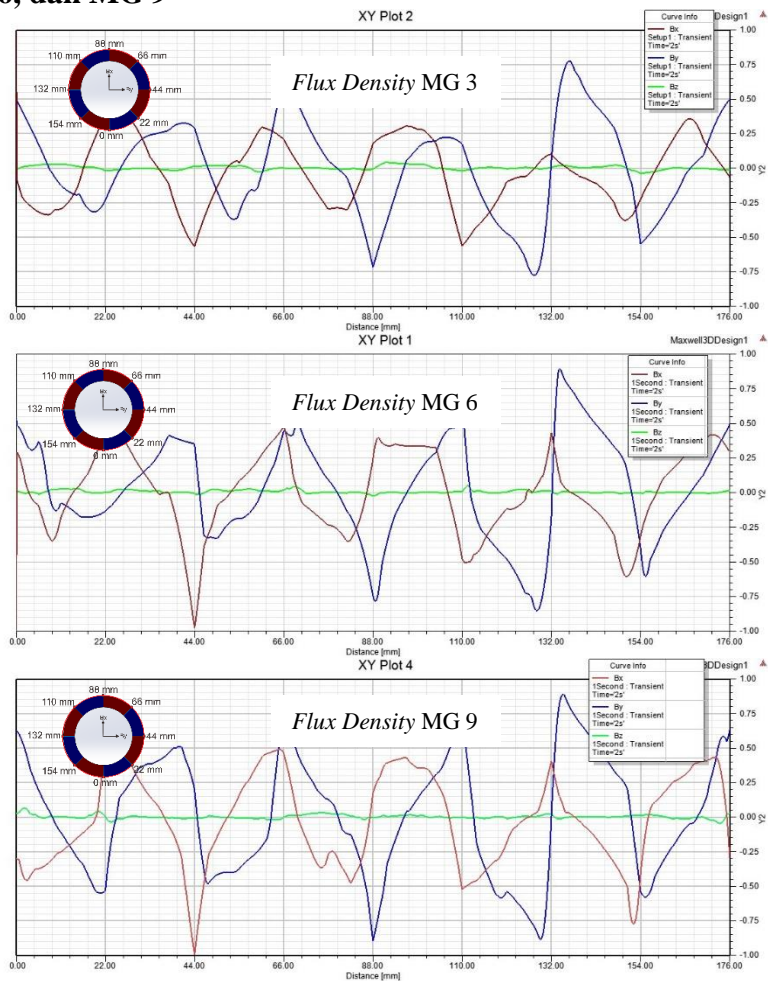
DAFTAR PUSTAKA

- Arthur F., 1992, *Fundamental Of Electricity And Magnetism*, Tokyo: McGraw-Hall Kogakusha, Ltd.
- Eclipse Magnetics Ltd, *NdFeB Magnets / Neodymium Iron Boron Magnets Datasheet*, England.
- Idayanti & Dedi, 2006, Karakterisasi Komposisi Kimia Magnet NdFeB dengan Energi Disfese Spectroscopy (EDS), *Jurnal Elektronika* 6 (2).
- Jørgensen, F.T., 2010, Design and construction of permanent *magnetic gears*, *Disertasi*, Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Manaf A., 2000, Magnet Permanen Berbasis Nd-Fe-B.
- Muruganandam G., Padma S., dan Selvakumar P., 2012, Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations, *International Journal of Electrical Engineering* 5 (7).
- Matthe A., 2017, Development of a *Magnetic gear* for Dry-Cooling Power Plant Applications, *Tesis*, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Stellenbosch.
- Ruoho S., 2007, Demagnetisation of Permanent Magnets in Electrical Machines, 1.
- Taufik dkk, 2012, Analisis Komposisi Dan Kurva B-H Bahan Low Carbon Steel Pt. Krakatau Steel Menggunakan VSM Dan EDX Untuk Keperluan Desain Magnet Siklotron 13-MeV, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Januari 2012. 13.
- Wang Y.L., 2015, A wave energy converter with *magnetic gear*, *Ocean Engineering*, 1.
- Yadhu Raj dkk, 2016, *Magnetic gearing System*, *IJIRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2 (12).

LAMPIRAN 1 : Data Hasil Simulasi

Pasang <i>Magnetic gear</i>	LS (mm) Din-Dout	HS (mm) Din-Dout	<i>Air gap</i> (mm)	Torsi Maksimum (Nm)
MG 1	20-28	10-15,5	1	5,926
			2	4,798
			3	4,012
MG 2		8-15,5	1	6,865
			2	5,678
			3	4,924
MG 3		6-15,5	1	7,374
			2	6,51
			3	5,936
MG 4	18-28	10-15,5	1	6,006
			2	5,756
			3	5,036
MG 5		8-15,5	1	7,503
			2	6,74
			3	5,688
MG 6		6-15,5	1	8,346
			2	7,23
			3	6,314
MG 7	16-28	10-15,5	1	6,64
			2	5,954
			3	5,415
MG 8		8-15,5	1	8,052
			2	6,864
			3	5,931
MG 9		6-15,5	1	8,712
			2	7,548
			3	6,483

LAMPIRAN 2 : Grafik Bx, By, dan Bz pada MG 3, MG 6, dan MG 9



LAMPIRAN 3 : Spesifikasi *Steel Spur Gears*



Specifications	
Precision grade	JIS grade H9 (JIS B1702-1: 1997) JIS grade 4 (JIS B1702: 1997)
Gear tooth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	S45C
Heat treatment	—
Tooth hardness	(less than 194HB)



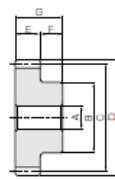
Catalog No.	Module	No. of teeth	Shape	Size	Hub dia.	Pitch dia.	Outside dia.	Face width	Hub width	Total length	Keyway	
				A or B	B	C	D	E	F	G	Width	Depth
SS1-65	m1	65	S1	10	40	65	67	10	10	20	—	—
SS1-65A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-66		66	S1	10	40	66	68	10	10	20	—	—
SS1-66A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-68		68	S1	10	40	68	70	10	10	20	—	—
SS1-68A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-70		70	S1	10	40	70	72	10	10	20	—	—
SS1-70A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-70B			S1K	15	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-70C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-72		72	S1	10	40	72	74	10	10	20	—	—
SS1-72A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-72B			S1K	15	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-72C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-75		75	S1	10	40	75	77	10	10	20	—	—
SS1-75A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-76		76	S1	10	40	76	78	10	10	20	—	—
SS1-76A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-80		80	S1	10	40	80	82	10	10	20	—	—
SS1-80A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-80B			S1K	15	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-80C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-84		84	S1	10	40	84	86	10	10	20	—	—
SS1-84A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-85		85	S1	10	40	85	87	10	10	20	—	—
SS1-85A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-88		88	S1	10	40	88	90	10	10	20	—	—
SS1-88A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-90		90	S1	10	40	90	92	10	10	20	—	—
SS1-90A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-90B			S1K	15	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-90C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-95		95	S1	10	40	95	97	10	10	20	—	—
SS1-95A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-96		96	S1	10	40	96	98	10	10	20	—	—
SS1-96A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-100		100	S1	10	40	100	102	10	10	20	—	—
SS1-100A			S1K	12	—	—	—	—	—	—	4 x 1.8	—
SS1-100B			S1K	15	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-100C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-110		110	S1	15	50	110	112	10	10	20	—	—
SS1-110A			S1K	15	40	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-120		120	S1	15	50	—	—	—	—	—	—	—
SS1-120A			S1K	15	40	120	122	10	10	20	—	—
SS1-120B			S1K	18	—	—	—	—	—	—	5 x 2.3	—
SS1-120C			S1K	18	—	—	—	—	—	—	6 x 2.8	—
SS1-150		150	S1	20	120	150	152	10	10	20	—	—
SS1-200		200	S1	20	160	200	202	10	10	20	—	—

LAMPIRAN 4 : (Spesifikasi *Stainless Steel Spur Gears*)

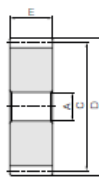


Specifications		
Precision grade	JIS grade N6 (JIS B1702-1: 1998) + JIS grade 4 (JIS B1702: 1976)	
Gear tooth	Standard full depth	
Pressure angle	20°	
Material	SUS303	
Heat treatment	---	
Tooth hardness	(less than 187HRC)	
Module	m 1.5	m 2
Face width (E)	15	20
Screw offset (J)	7	8

* The precision grade of J-Series products is equivalent to the value shown in the table.



S1



S5

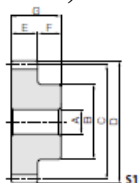
Catalog No.	No. of teeth	Shape	Bore A _{int}	Hub dia. B	Pitch dia. C	Outside dia. D	Hub width F	Total length G	Allowable torque (N·m)		Allowable torque (kgf·m)		Backlash (mm)	Weight (kg)
									Bending strength	Surface durability	Bending strength	Surface durability		
SUS1.5-15	15	S1	8	18	22.5	25.5	14	16	6.89	0.43	0.70	0.044	0.10~0.22	0.063
SUS1.5-16	16			20	24	27			7.63	0.50	0.78	0.051		0.076
SUS1.5-18	18			22	27	30			9.16	0.65	0.93	0.066		0.097
SUS1.5-20	20			24	30	33			10.7	0.82	1.09	0.084		0.12
SUS1.5-22	22		10	26	33	36			12.3	1.01	1.26	0.10		0.15
SUS1.5-24	24			28	36	39			13.9	1.23	1.42	0.13	0.12~0.26	0.17
SUS1.5-25	25			30	37.5	40.5			14.8	1.35	1.50	0.14		0.20
SUS1.5-28	28			36	42	45			17.2	1.71	1.76	0.17		0.26
SUS1.5-30	30			38	45	48			18.9	1.98	1.93	0.20		0.29
SUS1.5-32	32		12	40	48	51			20.6	2.27	2.10	0.23		0.33
SUS1.5-35	35			42	52.5	55.5	14	16	23.2	2.74	2.36	0.28	0.14~0.32	0.39
SUS1.5-36	36			45	54	57			24.0	2.91	2.45	0.30		0.42
SUS1.5-40	40			45	60	63			27.5	3.62	2.80	0.37		0.48
SUS1.5-42	42			45	63	66			29.2	4.01	2.98	0.41		0.51
SUS1.5-45	45		15	45	67.5	70.5			31.9	4.64	3.25	0.47	0.18~0.38	0.57
SUS1.5-48	48			45	72	75			34.5	5.31	3.52	0.54		0.62
SUS1.5-50	50			50	75	78			36.3	5.79	3.70	0.59		0.71
SUS1.5-55	55			55	82.5	85.5			40.7	7.08	4.15	0.72		0.86
SUS1.5-56	56		15	55	84	87			41.6	7.36	4.24	0.75	0.14~0.32	0.88
SUS1.5-60	60			60	90	93			45.2	8.51	4.61	0.87		1.01
SUS1.5-64	64			60	96	99			48.8	9.75	4.97	0.99		1.12
SUS1.5-70	70			70	105	108			54.2	11.8	5.52	1.20		1.39
SUS1.5-75	75		15	70	112.5	115.5			58.7	13.6	5.99	1.39	0.18~0.38	1.54
SUS1.5-80	80			80	120	123			63.2	15.6	6.45	1.59		1.83
SUS1.5-90	90			80	135	138			72.3	20.1	7.37	2.05		2.18
SUS1.5-100	100			80	150	153			81.4	25.2	8.30	2.57		2.58

LAMPIRAN 5 : (Spesifikasi *Plastic Spur Gears*)



Specifications	
Precision grade	JIS grade N6 (JIS B1702-1: 2005) * JIS grade 5 (JIS B1702: 2005)
Gear teeth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	MC901
Heat treatment	---
Tooth hardness	(115 ~ 120HRR)
Face width (E)	15
Hub width (F)	10
Total length (G)	25
Screw offset (J)	5

* The precision grade of J Series products is equivalent to the value shown in the table.



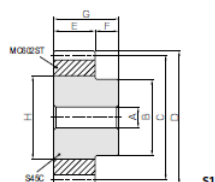
Catalog No.	No. of teeth	Shape	Bore A _{1/2}	Hub dia.	Pitch dia.	Outside dia.	Allowable torque (N·m)	Allowable torque (kgf·m)	Backlash (mm)	Weight (kg)
				B	C	D	Bending strength	Bending strength		
PS1.5-15	15	S1	8	18	22.5	25.5	1.39	0.14	0~0.38	0.0084
PS1.5-16	16			20	24	27	1.53	0.16		0.010
PS1.5-18	18			22	27	30	1.79	0.18		0.013
PS1.5-20	20			24	30	33	2.07	0.21		0.016
PS1.5-22	22			26	33	36	2.34	0.24		0.020
PS1.5-24	24			28	36	39	2.61	0.27		0.023
PS1.5-25	25			30	37.5	40.5	2.76	0.28	0~0.40	0.026
PS1.5-26	26			32	39	42	2.91	0.3		0.029
PS1.5-28	28			36	42	45	3.18	0.32		0.034
PS1.5-30	30			38	45	48	3.46	0.35		0.039
PS1.5-32	32			40	48	51	3.76	0.38		0.045
PS1.5-35	35			42	52.5	55.5	4.22	0.43		0.052
PS1.5-36	36			45	54	57	4.38	0.45		0.057
PS1.5-40	40			45	60	63	5.00	0.51		0.065
PS1.5-45	45			45	67.5	70.5	5.79	0.59		0.078
PS1.5-48	48		10	45	72	75	6.27	0.64		0.087
PS1.5-50	50			45	75	78	6.60	0.67		0.093
PS1.5-55	55			45	82.5	85.5	7.36	0.75		0.11
PS1.5-60	60			50	90	93	8.14	0.83		0.13
PS1.5-65	65			50	97.5	100.5	8.91	0.91		0.15
PS1.5-70	70			50	105	108	9.69	0.99	0~0.42	0.17
PS1.5-75	75		12	50	112.5	115.5	10.5	1.07		0.19
PS1.5-80	80			55	120	123	11.3	1.15		0.22
PS1.5-85	85			55	127.5	130.5	12.0	1.23		0.25
PS1.5-90	90			55	135	138	12.8	1.31		0.27
PS1.5-95	95			60	142.5	145.5	13.6	1.39		0.31
PS1.5-100	100			60	150	153	14.4	1.47		0.34

LAMPIRAN 6 : (Spesifikasi *Plastic Spur Gears with Steel Core*)



Specifications	
Precision grade	JIS grade N8 (JIS B1702-1: 1986) + JIS grade 5 (JIS B1702: 1976)
Gear teeth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	MC802ST with S45C core
Heat treatment	—
Tooth hardness	(115 ~ 120HRR)
Face width (E)	15
Hub width (F)	12
Total length (G)	27
Screw offset (J)	6

* The precision grade of J Series products is equivalent to the value shown in the table.

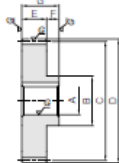


Catalog No.	No. of teeth	Shape	Bore	Hub dia.	Pitch dia.	Outside dia.	Metal core dia.	Allowable torque (N·m)	Allowable torque (kgf·m)	Backlash (mm)	Weight (kg)
			A ₁₇	B	C	D	H	Bending strength	Bending strength		
NSU1.5-28	28	S1	10	30	42	45	30	3.82	0.39	0~0.38	0.15
NSU1.5-30	30				45	48	30	4.15	0.42		0.15
NSU1.5-32	32			33	48	51	33	4.51	0.46	0~0.40	0.18
NSU1.5-34	34				51	54	33	4.88	0.50		0.19
NSU1.5-35	35				52.5	55.5	36	5.07	0.52		0.20
NSU1.5-36	36				54	57	36	5.26	0.54		0.21
NSU1.5-40	40			40	60	63	45	6.00	0.61		0.31
NSU1.5-45	45				67.5	70.5	45	6.94	0.71		0.33
NSU1.5-48	48				72	75	45	7.53	0.77		0.33
NSU1.5-50	50				75	78	45	7.92	0.81		0.33
NSU1.5-56	56		12	50	84	87	55	9.09	0.93	0~0.42	0.50
NSU1.5-60	60				90	93	55	9.89	1.01		0.51
NSU1.5-68	68				102	105	67	11.3	1.15		0.66
NSU1.5-70	70				105	108	70	11.7	1.19		0.70
NSU1.5-80	80			60	120	123	85	13.5	1.38		1.01
NSU1.5-90	90				135	138	100	15.4	1.57		1.29

LAMPIRAN 7 : (Spesifikasi *Ground Spur Gears*)



Specifications	
Precision grade	JIS grade No.1 (JIS B1700-1: 1995) JIS grade 1 (JIS B1700: 1995)
Gear tooth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	SCM415
Heat treatment	Overall carburizing
Tooth hardness	55 ~ 60HRC



S1

Catalog No.	Module	No. of tooth	Shape	Bore A A ₁	Hub dia. B	Pitch dia. C	Outside dia. D	Face width E	Hub width F	Total length G	Web thickness H	Web O.D. I
MSG1.5-15**	m1.5	15	S1	10	18	22.5	25.5	15	10	25	—	—
MSG1.5-18		18	S1	10	22	27	30	15	10	25	—	—
MSG1.5-20		20	S1	12	25	30	33	15	10	25	—	—
MSG1.5-24		24	S1	12	28	36	39	15	10	25	—	—
MSG1.5-25		25	S1	14	30	37.5	40.5	15	10	25	—	—
MSG1.5-30		30	S1	15	30	45	48	15	10	25	—	—
MSG1.5-35		35	S1	15	32	52.5	55.5	15	10	25	—	—
MSG1.5-36		36	S1	15	32	54	57	15	10	25	—	—
MSG1.5-40		40	S1	16	35	60	63	15	10	25	—	—
MSG1.5-45		45	S1	16	40	67.5	70.5	15	10	25	—	—
MSG1.5-48		48	S1	16	40	72	75	15	10	25	—	—
MSG1.5-50		50	S1	18	40	75	78	15	10	25	—	—
MSG1.5-55		55	S1	20	45	82.5	85.5	15	10	25	—	—
MSG1.5-60		60	S1	20	45	90	93	15	10	25	—	—
MSG1.5-70		70	S1	20	45	105	108	15	10	25	—	—
MSG1.5-80		80	S1	20	45	120	123	15	10	25	—	—
MSG1.5-100		100	S1	25	50	150	153	15	10	25	—	—

BIODATA PENIULIS



Penulis lahir di Kabupaten Nganjuk pada tanggal 12 Januari 1996, dari pasangan Bapak Kaso Mustamin dan Ibu Puji Astutik. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Jenjang pendidikan formal yang pernah ditempuh adalah TK Aisyah Padaelo, SD Negeri 1 Tanete Rilau Barru, SMP Negeri 3 Tanete Rilau Barru, SMA Negeri 1 Tanete Rilau Barru.

Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri yaitu Program Studi D III Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pada tahun 2016 penulis menyelesaikan pendidikan diploma yang ditempuh selama tiga tahun, lalu melanjutkan pendidikan sarjana di Program Lintas Jalur Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam Organisasi Mahasiswa. Kegiatan yang pernah diikuti penulis diantaranya GERIGI (Generasi Integralistik) ITS (2013), Pendamping Keilmiah FTI ITS (2014), Leadership and Organizing Training 1 (2014), Leadership and Organizing Training 2 (2015). Penulis pernah menjadi pengurus dalam Himpunan Mahasiswa Diploma Mesin (HMDM) periode 2014/2015, menjadi kepala departemen sosial masyarakat di BEM FTI ITS periode 2015/2016, dan saat menempuh sarjana penulis menjabat sebagai menteri sosial masyarakat di BEM ITS periode 2016-2017.

Alamat email : doni.iqhram@gmail.com